Etudes et Thèses

HYDROLOGIE ET HYDROCHIMIE D'UN MILIEU LAGUNAIRE TROPICAL : LE LAC TOGO

Bertrand MILLET

Éditions de l'ORSTOM

INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION

Bertrand MILLET

HYDROLOGIE ET HYDROCHIMIE D'UN MILIEU LAGUNAIRE TROPICAL : LE LAC TOGO

Éditions de l'ORSTOM
INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE SCIENTIFIQUE POUR LE DÉVELOPPEMENT EN COOPÉRATION
Collection **ETUDES et THESES**
PARIS 1986

Cette étude a fait l'objet d'une thèse présentée
à l'Université de Paris-Sud le 20 avril 1984
pour obtenir le titre de docteur de 3ème cycle

« La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, « que les «copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées « à une utilisation collective» et, d'autre part, que les analystes et les courtes citations dans un but « d'exemple et d'illustration, «toute représentation ou reproduction intégrale, ou partielle, faite sans le « consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayant cause, est illicite» (alinéa 1er de l'article 40).

« Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une « contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code Pénal».

ISSN : 0767-2888
ISBN : 2-7099-0788-7

© ORSTOM 1985

Que sont les hommes et les siècles
Pour la mer
Le ressac vient
Qui les étreint et les emporte ...

(Anonyme grec)

AVANT PROPOS

—*—

Avant toute chose, je tiens à exprimer mes vifs remerciements à tous ceux dont la compréhension et la fructueuse collaboration, ont fait de cette synthèse, une oeuvre collective :

- Monsieur KOKOU KATAKOU, Chef de la Division Hydrologie à la Direction de l'Hydraulique de la République Togolaise, qui après avoir eu l'initiative de cette étude lagunaire, en a toujours facilité le déroulement en y apportant son précieux concours.

- Monsieur le Directeur Général de l'ORSTOM, Monsieur Marcel ROCHE, Chef du Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, Messieurs Jean-François VIZIER et Bernard HUGUENIN, Directeurs du Centre ORSTOM de LOME, qui ont assuré l'organisation administrative et le financement de l'étude.

Je tiens également à remercier :

- Monsieur le Professeur Jean-Charles FONTES, Directeur du Laboratoire d'Hydrologie et de Géochimie Isotopique de l'Université d'ORSAY, qui m'a accueilli dans son laboratoire et a accepté de présider le jury de cette thèse.

- Monsieur Jacques COLOMBANI, Directeur de Recherches hydrologue à l'ORSTOM, qui m'a fait bénéficier de nombreuses suggestions lors de l'élaboration de ce travail.

- Monsieur Serge PIEYNS, Ingénieur hydrologue à l'ORSTOM, pour l'intérêt constant qu'il a accordé à mes travaux de recherches, et de son soutien qui m'a toujours beaucoup motivé.

- Monsieur Hervé TEXIER, Maître de Conférence, que je rencontrais au BENIN alors qu'il travaillait lui-même sur les lagunes de ce pays voisin, et qui m'a apporté le fruit de son expérience.

Mais je reste particulièrement reconnaissant à Monsieur Luc Le BARBE, Ingénieur hydrologue de l'ORSTOM, pour le soin avec lequel il a toujours suivi l'élaboration de ce travail, et de l'aide bénéfique qu'il m'a apportée jusqu'à son achèvement. Qu'il reçoive ici mon très amical remerciement.

Enfin, je ne voudrai pas oublier :

- Monsieur le Professeur H.B. PURSER, Directeur du Laboratoire de Sédimentologie de l'Université d'ORSAY, pour les facilités qu'il m'a accordées lors de la rédaction de ce travail.

Monsieur Jean-Pierre DEBUICHE, ainsi que Madame TOURMAN, respectivement dessinateur et dactylo au Laboratoire d'Hydrologie de l'ORSTOM, pour leur contribution efficace et leur patience amicale lors de la réalisation finale du document.

—*—

INTRODUCTION

Les milieux "paraliques" (1), très répandus à la surface du globe, se caractérisent avant tout par l'invraisemblable diversité de leur environnement physique, tant de par leur configuration géomorphologique et bathymétrique, que de par leurs caractéristiques hydroclimatologiques régionales et les gradients hydrochimiques et biologiques qu'ils présentent.

Ces milieux constituent paradoxalement de véritables écosystèmes originaux, totalement distincts des domaines limitrophes continental et marin et partageant en dépit d'un grand éclatement géographique, quelques propriétés fondamentales communes.

Parmi ces milieux paraliques, toujours extrêmement productifs, les "lagunes" proprement dites, de par leur localisation margino-littorale, leurs dimensions relativement restreintes et leur dynamique spatio-temporelle fortement contrastée, présentent une importance de plus en plus grande dans les économies régionales et la connaissance de leurs caractéristiques hydrologiques et leur potentialité biologique est de plus en plus sollicitée.

Après une rapide synthèse problématique relative à l'étude des milieux lagunaires d'une façon générale et en zone intertropicale plus particulièrement, la présente étude se proposera, dans une optique descriptive globale, de mettre en évidence les principales caractéristiques géomorphologiques, hydroclimatologiques et hydrochimiques du système margino-littoral togolais, qui appartient à l'ensemble typiquement "lagunaire" développé le long de la côte du Golfe de Guinée, sous régime équatorial de transition et tentera, en outre, une approche de la dynamique hydrologique de ce système.

(1) paralique = du grec "para" : à côté de ; et "halos" : le sel ; (et "la mer" par extension).

CHAPITRE I

LES MILIEUX LAGUNAIRES

PRESENTATION ET PROBLEMATIQUE EN REGIME TROPICAL

1 - LA DEFINITION DES MILIEUX LAGUNAIRES : rigueur dans la diversité

Les milieux lagunaires, dans leur immense diversité, ne font l'objet que de définitions trés générales, fondées sur quelques aspects morphologiques communs et la permanence de certaines conditions dynamiques sur tous les continents. Les deux définitions suivantes apparaissent bien représentatives de toutes les réflexions d'un grand nombre d'auteurs :

> "Une lagune : une dépression côtière située au-dessous du niveau moyen des océans, ayant une communication permanente ou temporaire avec la mer, mais isolée de celle-ci par un cordon ou tout autre type de barrière littorale".
> (d'après LANKFORD R.R., 1976).

> "Un milieu lagunaire : un environnement dynamique particulier, où différentes énergies interfèrent pour apporter et répartir des sédiments terrigènes et marins. Le lieu d'interférence de ces énergies avec le sédiment intervient dans une tranche d'eau peu profonde qui se trouve partiellement fermée par un cordon littoral, et ayant une communication éphémère ou restreinte avec la mer à travers une passe".
> (d'après PHLEGER F.B., 1960).

La notion de "lagune" stricto sensu est donc toujours associée à un type de relation avec la mer (lagunes paraliques), par l'intermédiaire d'une "barrière" littorale (appelée également "seuil" - "flèche" - "cordon" - ou "lido") dont la morphologie, déterminant le régime hydrologique de ces milieux, est un des facteurs les plus importants qui conditionnent la nomenclature lagunaire (SEYLER P, 1980) :

Si le "seuil" reste au-dessous du niveau des plus basses marées et si l'ensemble du plan d'eau lagunaire se trouve en zone intertidale, on ne parlera que de "pseudo lagune", fréquemment rencontrée lorsque le seuil a une origine géologique indépendante des conditions dynamiques littorales actuelles :

Etang de Berre, chaînon crétacé de la Nerthe.

Bahiret el Biban (Tunisie), cordon fossil tyrrhénien.

Langebaan lagoon (Afrique du Sud), barrière granitique.

Si la "barrière littorale" est constituée d'une bande de sédiments communiquant régulièrement avec la mer au niveau de quelques "passes" (appelées aussi "graus" - "exutoires" ou "émissaires") dont l'existence est conditionnée par le transit sédimentaire le long du littoral, on parlera de "bassins lagunaires" proprement dits, ou bien "d'étangs littoraux" (LEVY A., 1971) dans le cas où les communications avec la mer sont plus épisodiques et liées aux actions conjuguées des vents et des marées, ou marées-tempêtes.

Dans le cas de progradation rapide de la côte, il se trouve que les nappes lagunaires ne soient plus en communication avec la mer même temporairement et définissent ainsi des "étangs" (LEVY A., 1971), des "lagunes fermées", des "lagunes deltaïques" appelées généralement des "lagunes supratidales".

Enfin, un dernier type de "barrière lagunaire" issue d'un concrétionnement (biogénique) récifal, définit "les atolls" coralliens, fréquents dans le Pacifique.

Les milieux lagunaires représentent 13 % de l'ensemble des côtes du globe et se répartissent autour des différents continents de la façon suivante (LARRAS J., 1964) :

Océan Arctique	30 %
Océan Atlantique	25 %
Océan Indien	22 %
Mers Intérieures et Grands Lacs	13 %
Océan Pacifique	10 %

PHLEGER (1969), NICHOLS et ALLEN (1981) montrent que le tiers de la côte du Golfe du Mexique, 56 % des côtes du continent Nord Américain, ainsi que la quasi totalité de la côte ouest mexicaine, sont constitués de lagunes.

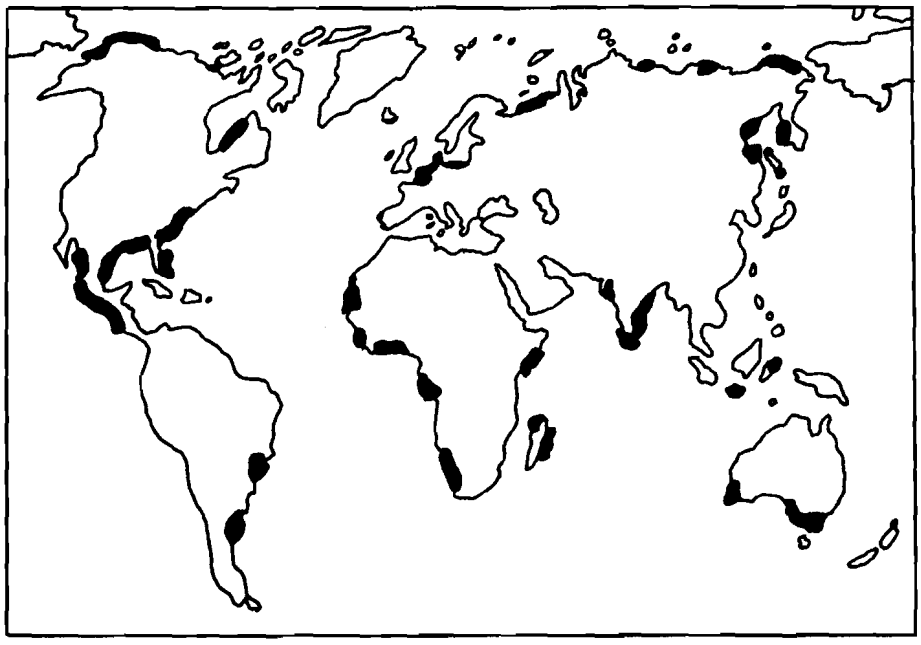


Fig-1

REPARTITION GEOGRAPHIQUE DES LAGUNES SUR LE GLOBE
(d'après LARRAS,1964)

Les lagunes apparaissent donc comme des milieux assez répandus, étroitement liés au domaine margino-littoral marin mais présentant un certain nombre de caractéristiques dynamiques et morphologiques suffisamment originales pour ne jamais être confondues avec les milieux ouverts deltaïques ou estuariens. Une description plus fine de la morphologie des lagunes et des cordons littoraux sera à la base de toute classification de ces milieux particuliers, dont les caractéristiques fondamentales sont, et sur l'ensemble des continents, directement issues de l'évolution des marges continentales au cours du Quaternaire récent.

2 - LA FORMATION DES MILIEUX LAGUNAIRES : un double héritage, continental et marin

Deux hypothèses sont traditionnellement avancées pour tenter d'expliquer le mécanisme de la formation des lagunes côtières :

- L'hypothèse tectonique, déjà assez ancienne (DE BEAUMONT, 1845 ; JOHNSON, 1919), qui décrit l'émergence progressive d'une barrière littorale, limitant l'écoulement vers la mer des eaux continentales et constituant de ce fait un bassin côtier littoral, ne permet pas cependant d'interpréter la plus grande partie des lagunes observées (PHLEGER et AYALA-CASTANARES, 1972).

- La seconde hypothèse qui associe l'élaboration progressive de la barrière littorale détritique, à la succession de régressions et de transgressions marines au cours du Quaternaire récent, semble avoir été reprise par de nombreux auteurs et peut se résumer comme suit :

. Stabilisation du niveau des océans à 5 ou 8 mètres au-dessus du niveau actuel au cours du Pleistocène, 80.000 ans B.P. (période interglaciaire de SANGAMON en Amérique du Nord, INCHIRIEN du littoral du Sénégal et de Mauritanie), avec la formation de barrières côtières et deltas en Amérique Centrale ou de falaises dans le Continental Terminal en Afrique de l'Ouest.

. Régression marine jusqu'à un niveau inférieur d'une centaine de mètres à l'actuel et qui atteint son maximum vers 18.000 ans B.P. (glaciation du WISCONSIN en Amérique du Nord, WURM en Europe, OGOLIEN du Sénégal), avec accumulation littorale de sédiments terrigènes argilo-sableux.

. Transgressions holocènes qui débutent vers 18.000 ans et dont la dernière phase paraît être, à partir de 6.000 ou 7.000 ans B.P. (NOUAKCHOTTIEN d'Afrique Occidentale, FLANDRIEN d'Europe), à l'origine de l'inondation des dépressions littorales et de la formation des barrières côtières à partir des sédiments marins et continentaux sous l'effet de l'énergie des vagues et des courants littoraux. L'élévation des barrières côtières se ferait progressivement au fur et à mesure de la montée du niveau de la mer.

D'après EMERY, 1967 ; HOYT, 1967 ; PHLEGER et AYALA-CASTANARES, 1972 ; ASSEMIEN et al., 1970 ; LANKFORD, 1976 ; PHLEGER, 1969-1981), la vitesse de la dernière transgression est estimée, dans sa phase finale, de l'ordre de 15 à 20 cm par siècle, avec un niveau de la mer inférieur d'une dizaine de mètres par rapport au niveau actuel au début de la formation des barrières littorales (5.000 ans B.P.). Le niveau actuel des eaux ainsi que la stabilisation des barrières littorales semblent atteints depuis 2.000 ans B.P.

(JELERGSMA, 1961 ; CURRAY, 1961 ; SCHOLL, 1964 ; VAN STRAATEN, 1965 ; PHLEGER, 1965-b).

Cette dépendance entre l'apparition des lagunes paraliques et l'histoire du Quaternaire marin est confirmée par un grand nombre d'auteurs dans des régions très diverses :

- en Afrique de l'Ouest	: JUNNER (1940)
- San Antonio Bay (Texas)	: SHEPARD (1956)
- Laguna Madre (Texas)	: FISK (1959) ; RUSNAK (1960)
- Galveston Island (Texas)	: BERNARD et al. (1962)
- Lagunes d'Ojo de Liebre et Guernero Negro (Baja California)	: PHLEGER et EWING (1962) ; PHLEGER (1965-b)
- Littoral des Pays-Bas	: VAN STRAATEN (1965)
- Littoral du Golfe Persique	: EVANS et BUSH (1969)
- Lagunes de Côte d'Ivoire	: ASSEMIEN (1970)
- Lagunes du Bénin	: TASTET (1975) ; GERMAIN (1975) ; LANG et PARADIS (1977) ; RABIER et al. (1979)

L'évolution morphologique actuelle de ces milieux lagunaires semble plutôt conditionnée par un équilibre entre les deux dynamiques principales qui s'y affrontent, à savoir, les processus de sédimentation et les processus d'érosion, soit marins, soit continentaux, selon les régimes d'écoulement des eaux continentales et des marées, ainsi que les influences des vagues et courants littoraux. Généralement une tendance à la sédimentation semble se dégager dans ces milieux éphémères qui peuvent de façon générale être intégrés dans un processus de progradation côtier (PHLEGER, 1981). D'autre part l'action érosive éolienne directe paraît être d'autant plus limitée sur les barrières littorales, qu'un phénomène de consolidation des sédiments en surface aurait été mis en évidence par le dépôt des aérosols riches en chlorure de sodium, sous l'action permanente des vents marins (BOYCE, 1954 en Caroline du Nord ; BOUGHEY, 1957 au Ghana ; HINGSTON et GARLITIS, 1976 en Australie).

En ce qui concerne plus particulièrement l'évolution du littoral sableux du Golfe de Guinée, KITSON (1916) interprète déjà l'entretien régulier du cordon littoral comme le résultat de l'action conjuguée des vagues et de la dérive côtière d'ouest en est (courant de Guinée). KOURIATCHY (1934) et BERNARD (1939) confirment l'importance de ces deux facteurs dominants dans le maintien du littoral périodiquement érodé par l'action de l'écoulement des eaux continentales en saison humide, mais en insistant sur l'importance dans les processus de sédimentation de l'orientation de la côte qui se présente par endroit à 45 degrés par rapport à la direction des vents dominants de sud-ouest (Côte d'Ivoire - Togo - Bénin - l'ouest du Nigéria). Enfin, en ce qui concerne le Togo, les travaux de BOUGHEY (1957) mettent en évidence l'aspect récent des formations littorales par l'observation de rivages fossiles en lagune : falaises dans le Continental Terminal et formations de beach-rocks. Les sables du cordon littoral seraient d'origine continentale (Saharienne), après transport éolien puis marin le long du Golfe (WEBB, 1958).

Ainsi, quel que soit le continent, le rôle des variations du niveau de la mer ainsi que la dynamique des courants littoraux et des vagues dans l'élaboration et l'évolution actuelle des lagunes proprement dites, semble très souvent admis. Mais la diversité morphologique de ces milieux, liée aussi à leur environnement continental, est fondamentale à considérer dans toute approche de leur dynamique hydrologique ou sédimentaire, ce qui constituera la base de toute classification.

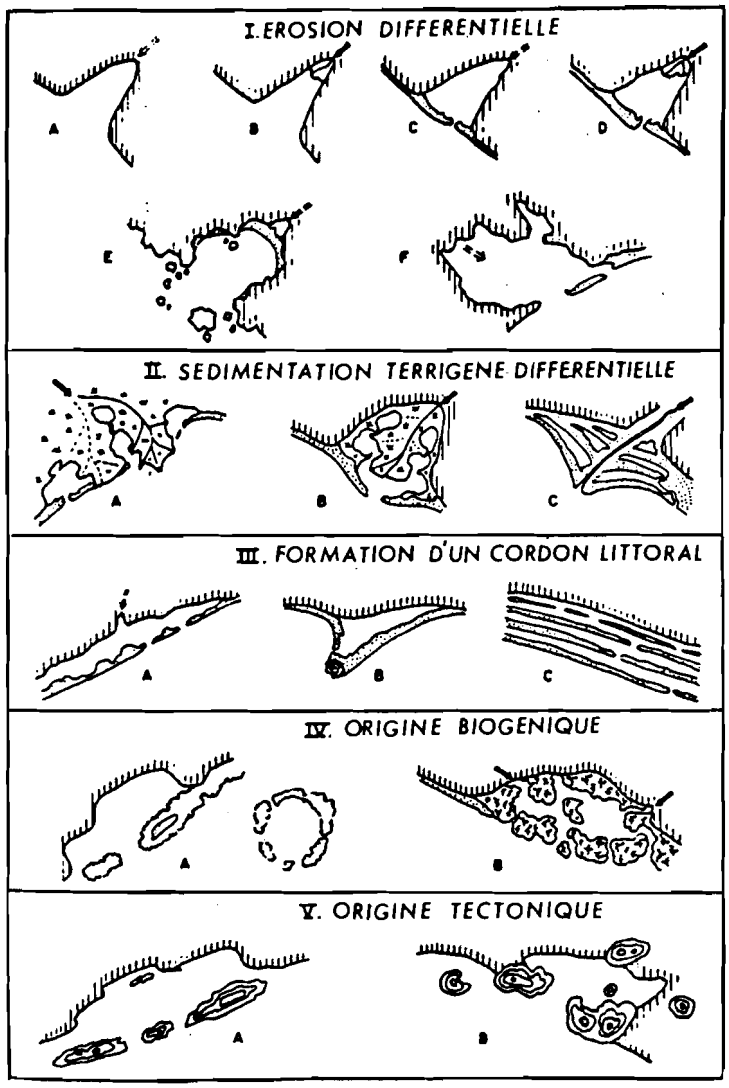


Fig-2
Différents types de lagunes cotières en fonction de leur processus de formation
(D'après LANKFORD,1977)

3 - LES TENTATIVES DE CLASSIFICATION DES MILIEUX LAGUNAIRES

Toute systématique lagunaire doit reposer à la fois sur des considérations dynamiques de faciès (formation) et sur des critères de milieux, découlant bien souvent les uns des autres.

C'est dans cette optique qu'au Mexique, connu pour la diversité de son environnement littoral riche en lagunes et de ses régimes climatiques, LANKFORD R.R. (1976) a établi une classification lagunaire, à partir de l'observation de 123 cas, fondée principalement sur les origines et les phénomènes ultérieurs, ayant présidé au développement de la dépression lagunaire, ainsi que sur les procédés ayant contribué à l'élaboration du cordon littoral.

Cette approche essentiellement géologique le conduit à envisager 5 types principaux de lagunes, présentés en figure 2 :

Type I : Dépression lagunaires formées par érosion continentale différentielle au cours des dernières régressions marines et inondation au cours de la dernière transgression.
Stabilité depuis 5.000 ans.

Variantes A et B : Vallée noyée ouverte sur la mer, avec ou sans écoulement continental. Conditions d'énergie soumises essentiellement aux effets des vagues et des courants de décharge continentale.

Variantes C et D : Vallée noyée isolée de la mer par une barrière littorale, avec ou sans écoulement continental. Conditions d'énergie soumises aux effets de courants de décharge continentale et de marée, et aux effets du vent.

Variantes E et F : Canyon et dépression karstique inondés.

Type II : Sédimentation terrigène différentielle : Lagunes côtières associées avec des systèmes fluviatiles ou deltaïques issus de processus sédimentaires irréguliers ou de subsidence. Grande instabilité depuis 5.000 ans. Formations sédimentaires très récentes (souvent quelques centaines d'années seulement), isolant de petites dépressions deltaïques peu profondes.

Variantes A et B : Dépressions intra-deltaïques typiques avec ou sans barrières côtières. Conditions d'énergie généralement assez faibles, soumises aux effets de courant saisonnier, de décharge continentale et de marée.

Variante C : Succession de lagunes deltaïques dans un système de barrières sableuses multiples. Conditions d'énergie très faibles.

Type III : Dépressions côtières isolées par un cordon littoral sédimentaire élaboré et entretenu sous l'effet des vagues et des courants au cours des derniers 5.000 ans. Orientation le plus souvent parallèle à la côte. Milieux généralement peu profonds soumis aux conditions de transformation sédimentaire littorale sous les effets des courants continentaux et de marée, des vagues et des tempêtes. Il s'agit de la plupart des "lagunes côtières" typiquement décrites le long des côtes à bas relief.

Variantes A et B : Lagunes à barrières sableuses simples ou multiples, pouvant être très allongées, présentant un nombre variable de "passes" en relation permanente ou temporaire avec la mer et soumises essentiellement aux actions du vent et des courants. Conditions d'énergie très dépendantes du nombre et de la morphologie des "passes".

Variante C : Successions de barrières littorales allongées parallèlement à la côte, isolant de nombreuses lagunes soumises à des effets de marée variables et à de faibles conditions d'énergie.

Type IV : Elaboration de barrières littorales par des processus (biogéniques), au cours des derniers 5.000 ans et de morphologie très variables. Barrière corallienne (A) ou constituée de mangroves (B).

Type V : Elaboration de barrières littorales récentes par des processus tectoniques (A) ou volcaniques (B), indépendamment des variations du niveau de la mer.

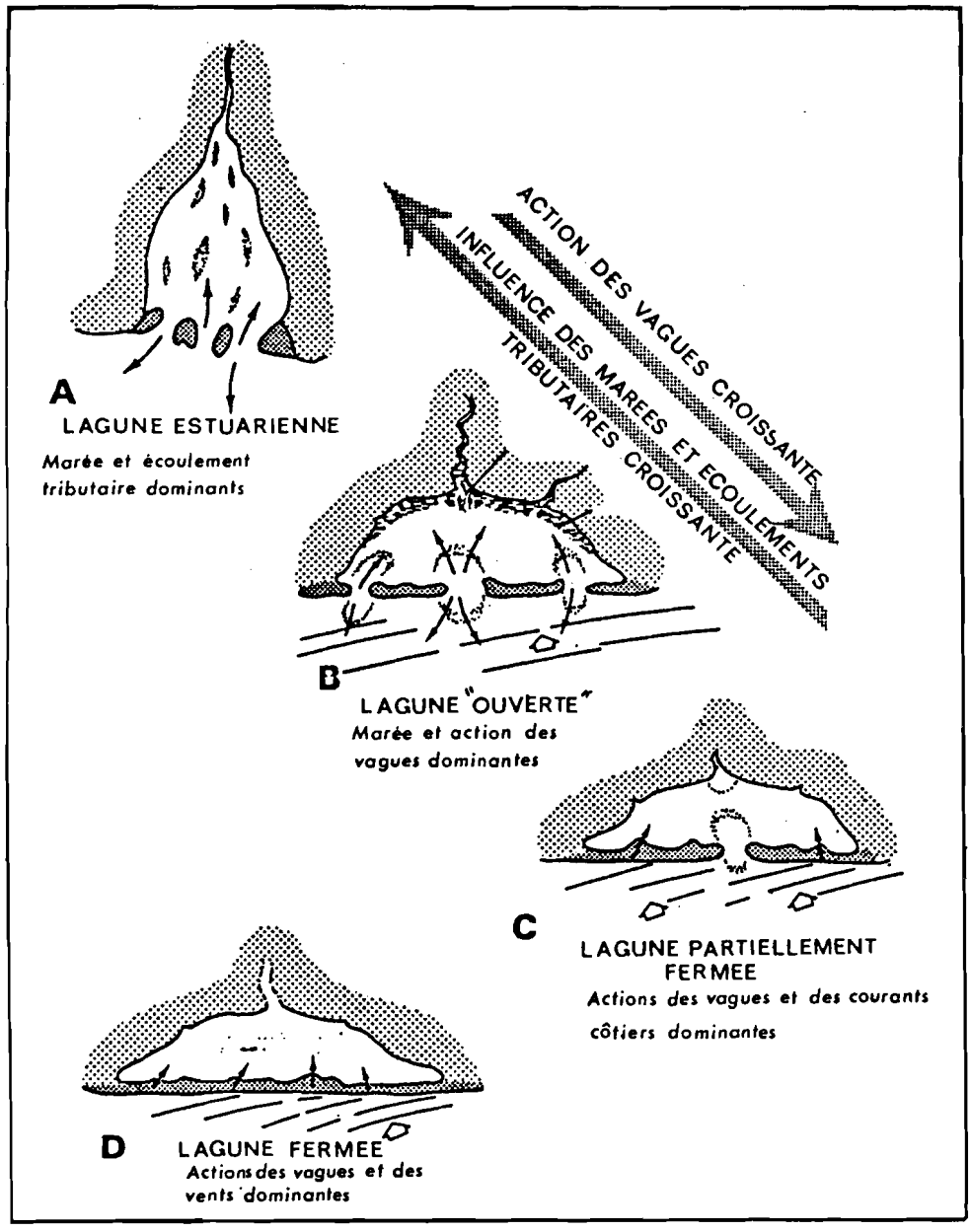


Fig-3

Classification schématique de différents types de lagunes cotières,en fonction de leurs facteurs dynamiques dominants

- NICHOLS et ALLEN (1981) reprennent une systématique lagunaire plus simple, fondée sur les critères dynamiques et énergétiques qui conditionnent tous les régimes hydrologiques et sédimentologiques en lagune, ainsi que l'évolution des différentes morphologies lagunaires. On distinguera deux facteurs dynamiques principaux à valeur systématique :
  . l'effet des courants de marée et de décharge continentale,
  . l'effet des vagues.

La Figure 3 présente quatre types lagunaires qui ont été classés en fonction de l'influence dominante respective de chacun de ces deux facteurs :

Type A - Lagune estuarienne : Dominance des effets de courants de marée et de décharge fluviale par rapport aux effets des vagues, accompagnée d'un transport sédimentaire important avec dépôt amont préférentiel.

Type B - Lagune ouverte : Combinaison entre un écoulement fluviatile et un effet de marée faible, avec des effets de vague plus actifs. Entretien régulier des "passes" par les courants. Sédimentation différentielle des vases en amont et des sables en aval.

Type C - Lagune partiellement fermée : Développement d'une barrière littorale isolant de la mer un plan d'eau lagunaire où domine une dynamique de vague, une dynamique de courant restant limitée à proximité de l'exutoire (delta de flot souvent développé). Sédimentation différentielle entre les zones exposées au vent et les zones abritées. Réduction des échanges avec la mer.

Type D - Lagune fermée : La conjonction de faibles courants de marée et de décharge continentale avec de fortes énergies de vagues et de courants côtiers, conduit à l'entretien quasi-permanent d'une barrière littorale fermée

Un plan d'eau lagunaire devient alors le siège d'une sédimentation détritique, organique, ou géochimique intense, soumise aux rythmes journalier des vents, et saisonnier des crues.

En ce qui concerne plus précisément le Golfe de Guinée, deux principaux types de lagunes sont très tôt mis en évidence par BERNARD (1939) et DE ROUVILLE (1946), à partir de considérations géographiques plus générales, mais conditionnant la dynamique hydrologique de ces lagunes :

Type A - Lagunes de faibles dimensions, de forme allongée et étroite, parallèles au cordon littoral sableux et communiquant avec la mer par quelque rares "passes" étroites, peu profondes et très espacées. Plans d'eau associés à de petits bassins versants et présentant un balancement saisonnier de la salinité des eaux, réparti de façon assez homogène sur toute l'étendue du plan d'eau (lagunes côtières du Togo et du Bénin).

Type B - Lagunes de grandes dimensions, recouvrant souvent d'anciens lits de rivière, associées à des bassins versants très étendus et en communication permanente avec la mer. Entretien permanent de gradients régionaux et/ou verticaux de salinité sous l'effet des marées et de la décharge continentale (lagunes de Côte d'Ivoire et de l'ouest du Nigéria).

Cette classification sommaire qui repose sur des observations géomorphologiques et hydroclimatologiques semble bien d'adapter à la description des milieux littoraux le long du Golfe de Guinée et a été reprise explicitement par PUGH (1954) au Nigéria, puis par BOUGHEY (1957) et WEBB (1958), en ce qui concerne l'ensemble de la côte du Golfe de Guinée, enfin par KWEI (1977) au Ghana.

En définitive, si l'on reprend le cas qui regroupe la majeure partie des "lagunes côtières" proprement dites (types III d'après LANKFORD R.R, 1976) - (cf. Fig. 2), et dont la description a été affinée par NICHOLS et ALLEN, 1981 - (cf. Fig. 3), il apparaît plus clairement que toute dynamique actuelle de tels milieux lagunaires typiques, relève d'une interdépendance étroite entre un ensemble de facteurs hydroclimatologiques qui répondent à une réalité locale bien définie et une morphologie très originale présentant une très grande variété régionale.

Le tableau 1 (d'après NICHOLS et ALLEN, 1981, p.66) présente schématiquement l'importance relative des différents processus dynamiques, hydrologiques et sédimentologiques associés à chacun des quatre principaux types de lagunes côtières proprement dites qui ont été décrits précédemment (cf. Fig. 3) et parmi lesquels les auteurs eux-mêmes situent le cas des milieux lagunaires du Golfe de Guinée et plus particulièrement celui du Lac Togo. En ce qui concerne le Lac Togo, sa classification dans le type D est partiellement justifiée par les observations que nous en feront les années de fermeture 1980-1983 et il en est de même de la petite lagune de Kuramo au Nigéria (WEBB, 1958), ou des

lagunes de Sakumo et Mukwe au Ghana (KWEI, 1977). Par contre, les grands ensembles lagunaires de Côte d'Ivoire (DURAND et SKUBICH, 1982 ; DURAND et CHANTERAINE, 1982), le complexe lagunaire constitué par la lagune de Porto-Novo au Bénin et la lagune de Lagos au Nigéria (PUGH, 1954 ; WEBB, 1958 ; RABIER et al., 1979), ainsi que le cas du Lac Nokoué au Bénin au cours de son ouverture sur la mer entre 1978 et 1982 (TEXIER et al., 1979, 1980) seraient à classer parmi les lagunes de type C.

Les lagunes côtières apparaissent donc comme des milieux marginolittoraux appartenant au domaine paralique au sens large et constituant de ce fait des entités écologiques indépendantes, très particulières, en marge des écosystèmes marins et continentaux. La très grande variabilité spatio-temporelle des conditions sédimentologiques, hydrodynamiques et physico-chimiques, la stratification des eaux et l'apparition de gradients physico-chimiques et biologiques, procurent à ces milieux fortement producteurs, des propriétés fondamentalement originales et d'importantes potentialités économiques. Toute approche scientifique préliminaire relative au fonctionnement de ces milieux mixtes, devra par l'intermédiaire d'un certain nombre de paramètres ou de descripteurs écologiques adaptés, s'orienter selon les quatre directions principales que sont : l'observation géomorphologique, suivie de l'interprétation des mécanismes d'ordre géologique, hydroclimatologique et océanographique, qui lui sont associés.

Tableau 1 - Processus dominants dans les principaux types de lagunes côtières proprement dites.
(d'après NICHOLS et ALLEN, 1981)

	Type A "Lagune estuarienne"	Type B "Lagune ouverte"	Type C "Lagune partiellement fermée"	Type D "Lagune fermée"
MORPHOLOGIE	Courbes barrières Chenaux profonds Zones intertidales	Barrières étendues Larges passes Deltas de marée	Barrières étendues Passes étroites Peu de deltas de marée	Barrière continue.
DYNAMIQUE	FORT ---------- Décharge continentale et marées ---------- FAIBLE FAIBLE ---------- Action des vagues ---------- FORT OUVERT ---------- Communication avec la mer ---------- FERME			
PROCESSUS DOMINANTS	Actions des courants continentaux et de marées	Actions des marées	Actions des crues, des vagues et courants côtiers	Actions des crues, du vent, de la production organique et précipitations chimiques.
SEDIMENT		Sable en aval Argile en amont	Sable à l'exutoire Argile dans le bassin	Argiles riches en matière organique. Evaporites
ECHANGES AVEC MER	Important	Variable	Faible	Percolations éventuelles
EXEMPLES	Allemagne NW	Hollande Mississipi	Rockport Bay au Texas	Israël, Lac Togo Golfe de Guinée

4 - LES CARACTERISTIQUES DES MILIEUX LAGUNAIRES

Nous avons vu que les lagunes côtières intègrent à travers leur morphologie particulière et leurs régime de fonctionnement, un ensemble de processus relevant d'une dynamique continentale ou marine, qui interfèrent étroitement au sein de ces milieux selon un rythme journalier ou saisonnier. Leur situation en marge de deux écosystèmes fondamentalement différents confère aux lagunes côtières un grand nombre de caractéristiques originales.

4.1 L'influence des facteurs physiques sur l'hydrodynamique lagunaire

4.1.1 L'influence des facteurs hydroclimatologiques continentaux

PHLEGER (1981) et MANDELLI (1981) au Mexique, OLANYIAN (1981) au Nigéria rappellent que les conditions d'alimentation des milieux lagunaires, le régime de circulation des eaux ainsi que celui des échanges avec la mer sont sous l'étroite dépendance des caractéristiques morphologiques des lagunes (taille - nombre de passes - forme), mais surtout des caractéristiques hydrodynamiques locales et climatologiques régionales. Il apparaît que la durée et la qualité de l'insolation, les variations de la température et de l'humidité atmosphérique, ainsi que le taux d'évaporation qui en résulte, influencent largement la qualité physico-chimique et chimique des eaux lagunaires (température de l'eau, oxygène dissous, salinité ...) et conditionnent, le cas échéant, l'apparition de précipitation géochimique : SEYLER (1980), KWEI (1977) au Ghana ; HERVE et BRUSLE (1980) sur l'étang de Salses-Leucate ; PHLEGER et EWING (1962) sur la lagune d'Ojo de Liebre au Mexique ; PHLEGER et al. (1972) sur les lagunes de Huizache-Caimanero au Mexique ; MEDHIOUB (1979) sur le Bahiret el Biban en Tunisie ; L'influence dynamique d'une très forte évaporation dans l'entraînement d'une masse d'eau lagunaire a été également observée par TWENHOFEL (1932) dans le Golfe de Kara Bugaz en Mer Caspienne et WOLANSKI et al. sur la Grande Barrière en Australie.

D'autre part, le régime régional des précipitations joue un rôle primordial dans le contrôle de l'écoulement dans les tributaires du milieu lagunaire, du ruissellement direct sur les berges et du régime des crues en lagune, avec l'ensemble des conséquences suivantes :

- évolution saisonnière des effets de dilution en période de mise en charge du plan d'eau et variation des caractéristiques hydrochimiques des eaux lagunaires et plus particulièrement si les eaux des tributaires ou de ruissellement sont influencées par le drainage d'une zone évaporitique ou d'une plaine d'inondation littorale riche en matière organique : SAVOURE (1977) ; MEDHIOUB (1979) et JEDOUI et al. (1981) en Tunisie ; OBENG (1977) au Ghana ; PHLEGER et al. (1972) et MANDELLI (1981) au Mexique.

- apports considérables d'éléments organiques, minéraux et plus particulièrement de nutriments au milieu, avec exportation vers la mer : BOUTIERE (1974) étang de Bages-Sigean ; MANDELLI (1981) qui compare l'évolution des stocks de nutriments sur les lagunes de Mitla, San Marcos et Chautengo au Mexique.

- apports sédimentaires terrigènes importants : JEDOUI et al. (1981) ; PHLEGER (1969-1981) avec comblement lagunaire et entretien du cordon littoral.

- ouverture du cordon littoral sous l'effet de la pression hydrostatique ou de phénomènes de thixotropie : LANKFORD (1976).

- élévation du niveau des eaux et effets de courant de vidange de crue : DURAND et al. (1982) en Côte d'Ivoire ; OLANYIAN (1981) au Nigéria ; KWEI (1977) au Ghana ; TEXIER et al. (1979) au Bénin.

Les références sur les caractéristiques et les mécanismes de transport physique en milieu lagunaire sont relativement peu nombreuses en comparaison avec les milieux estuariens. Or ces mécanismes sont très fréquemment dominants, en milieu lagunaire, par rapport aux phénomènes de circulation "thermo-haline", en raison principalment de l'influence capitale des courants de marée quand ils existent et des courants saisonniers de vidange de crue mais essentiellement sur ce type de milieux, des effets résultants de l'action du vent.

Le vent en effet provoque un brassage des eaux lagunaires, qui peut varier géographiquement sur le plan d'eau en fonction des différentes expositions et évolu selon un rythme saisonnier (latitude moyenne) ou journalier (basse latitude). Les vagues sont toujours à très courte période mais d'amplitude assez forte, en raison des faibles profondeurs et des courtes distances caractérisant ces milieux : période de 2 à 3 secondes - amplitude 0,50 à 1 mètre sur les lagunes mexicaines (LANKFORD, 1976) ; période de quelques secondes et amplitude pouvant atteindre 2,50 mètres en Australie (EMERY et al., 1957). Ce brassage mécanique joue un rôle dans l'homogénéisation des eaux lagunaires et limite les effets de stratification verticale des eaux avec thermo ou halo-

cline, selon un rythme saisonnier ou journalier en fonction du régime climatique local : BAUDIN (1980) sur l'étang de Citis ; WALKER (1981) sur la Grande Barrière en Australie. Ces effets d'homogénéisation rythmiques peuvent avoir des conséquences dans le stockage de l'énergie au sein de ces milieux (PHLEGER et al., 1962) et dans l'apparition de phénomènes d'eutrophisation cycliques sur les étangs méditerranéens (MINAS, 1977).

Le vent influence également la température et le taux d'humidité de l'air, conditionnant par conséquent le régime d'évaporation des eaux lagunaires SEYLER (1980) et provoquant parfois, mais de façon limitée, l'apparition de légers courants de convection journaliers, par augmentation de la salinité et baisse de la température des eaux de surface en début de soirée (PHLEGER et al., au Mexique).

Le vent enfin agit directement sur la circulation des eaux lagunaires par entraînement des eaux de surface et création de courants de surface et de fond inversés : BOUTIERE, (1974) sur l'étang de Bages-Sigean ; MEE, (1977) et MANDELLI, (1981) sur la lagune de Chautengo au Mexique ; NIXON et al., (1981) sur la lagune de Charleston et Green Hill au Rhode Island (courants gyratoires).

Cette action du vent sur la dynamique des eaux lagunaires peut avoir d'importantes conséquences dans la régulation des phénomènes suivants :

- le régime et l'importance des échanges avec la mer (MEDHIOUB, 1979 sur le Bahiret el Biban en Tunisie ; HERVE et BRUSLE, 1980 sur l'étang de Salse-Leucate ; NIXON et al., 1981 au Rhode Island) et la régulation des effets de marée (OLANYIAN, 1981 au Nigéria).
- le régime de l'érosion et de la sédimentation, ainsi que le tri des sédiments terrigènes et marins en lagune (EMERY et al., 1957 ; LAFOND, 1967 ; PHLEGER, 1969-1981 ; BOUTIERE, 1974 ; POSTMA, 1981 ; JEDOUI et al., 1981).
- les variations du niveau des eaux surtout sensibles sur les étangs méditerranéens (BOUTIERE, 1974 sur l'étang de Bages-Sigean ; HERVE et BRUSLE, 1980 sur l'étang de Salse-Leucate).

4.1.2 L'influcence des facteurs océanographiques

Ces facteurs, qui sont principalement des phénomènes de marée, des effet de vague et de dérive littorale, se manifestent en lagune de façon bien différente, d'un estuaire ouvert, à cause de l'étroitesse des passes et des faibles profondeurs qui caractérisent les milieux lagunaires (PHLEGER et al., 1962).

Les marées apparaissent en lagune comme des phénomènes oscillatoires de périodicité diurne ou semi diurne en fonction de la morphologie de la lagune et de sa localisation géographique, avec les cycles semi synodiques de vive-eau et de morte-eau dont on retrouve l'influence jusque dans les oscillations basses fréquences de la salinité des eaux. En lagune Ebrié (Côte d'Ivoire), les variations de salinité, les niveaux moyens journaliers en lagune et les niveaux moyens journaliers de pleine mer, coïncident avec une bonne approximation selon leur première harmonique (VARLET, 1978).

L'évolution d'une onde marée en lagune possède toujours les deux caractéristiques suivantes :

- une atténuation des amplitudes de variation du niveau et de la salinité des eaux, dès que l'on s'éloigne des passes, à cause des phénomènes de diffusion et de friction qui s'opposent à toute propagation de phénomènes de fréquence élevée. Les marnages présentent à travers la lagune un phénomène d'amortissement dont le coefficient suit une loi de décroissance exponentielle. Les ondes marée sont soit progressives, soit stationnaires, avec dans ce cas, des effets d'interférence avec les ondes retour à prévoir (VARLET, 1978 en Côte d'Ivoire). Des effets de mascaret ont été observés dans le cas de chenaux très étroits, très allongés, et peu profonds (EMERY et al., 1957).
- un déphasage de l'onde marée en lagune par rapport au cycle de la marée en mer, qui peut atteindre quelques heures, en augmentant avec l'éloignement par rapport aux passes (PHLEGER et al., 1962 ; VARLET, 1978).

L'influence des marées en milieu lagunaire reste de toute manière sous la dépendance étroite du marnage en mer, de la surface et de la morphologie lagunaire, du régime saisonnier de circulation des eaux en lagunes et des conditions de circulation hydrodynamiques des chenaux et des passes, dans lesquels la profondeur joue un rôle prépondérant (GROEN, 1969). Les principales conséquences des facteurs océanographiques en lagunes sont de quatre types : dynamique, chimique, sédimentologique et biologique.

Les marées apparaissent en effet comme le principal facteur de dispersion des eaux lagunaires. On distingue une diffusion longitudinale due à un partage latéral du courant de marée lié à une friction sur le fond et le long des berges, une diffusion longitudinale due au stockage temporaire d'eau en zone morte et une diffusion longitudinale par courants résiduels induits par les marées et liés à la morphologie locale (ZIMMERMANN, 1981).

Les marées d'autre part en provoquant à fréquence élevée des déplacements rapides de masses d'eau, la propagation de coins salés et des échanges importants avec la mer, induisent de grandes variations journalières du taux en dilution, de la salinité, de la température et des teneurs en nutrient des eaux lagunaires (KWEI, 1977 au Ghana ; TEXIER et al., 1979 au Bénin ; MEDHIOUB, 1979 en Tunisie ; NIXON et al., 1981 au Rhode Island ; MANDELLI, 1981 au Mexique).

MEDHIOUB (1979) sur le Bahiret el Biban insistera sur l'effet des marées comme régulateur thermique des eaux lagunaires mais aussi comme facteur d'activation évaporitique en bordure du plan d'eau.

MANDELLI (1981) sur la lagune Chautengo au Mexique, insistera sur le rôle de l'exportation des nutrients terrigènes sous l'effet des marées, comme facteur préventif de l'eutrophisation.

D'une façon générale l'impact des cycles de marée sur l'évolution de la qualité physico-chimique des eaux lagunaires est d'autant plus important que le temps de mélange des eaux en lagune ou en mer est inférieur à un demi cycle marée (ZIMMERMANN, 1981).

Les facteurs océanographiques jouent un rôle important dans l'évolution sédimentologique des lagunes :

> la vitesse des courants de marées dépasse fréquemment en période de mi-marée le seuil critique d'érosion au niveau des chenaux et des passes (PHLEGER, 1969) ; la salinité des eaux lagunaires, variant en fonction de la nature et de la fréquence des contacts avec la mer, peut atteindre très fréquemment le seuil critique de floculation des sédiments en suspension, avant leur décantation ultérieure (LAFOND, 1967 ; JEDOUI et al., 1981 en Tunisie) ; mais surtout, les courants de marées, liés aux influences permanentes de la force et de l'orientation des vagues et des courants littoraux et à l'action occasionnelle des tempêtes,

participent directement à l'élaboration, l'entretien ou la transformation morphologique des passes, par ouverture des cordons littoraux, migrations sédimentaires sous l'effet des équilibres entre dérives littorales et courants de marée, développement de "deltas" de marée en fonction des régimes hydrodynamiques saisonniers, colmatage, etc... Le nombre et la taille des passes dépendra donc au cours des saisons, des apports continentaux et de la superficie lagunaire mais aussi du régime des échanges avec la mer sous l'effet des marées, et de la dynamique littorale sous l'effet des courants littoraux et des vagues (EMERY et al., 1957 ; PHLEGER, 1969 ; LANKFORD, 1976 ; SEYLER, 1980).

Les effets de marée interviennent dans la migration de nombreuses espèces de crustacés et de poissons, ainsi que de leurs juvéniles (KWEI, 1977 au Ghana ; PLIYA, 1980 au Bénin) et dans l'apparition de zonations latérales et verticales d'espèces (PHLEGER et al., 1972 ; FLEMMING, 1976).

4.2 Les caractères sédimentologiques et physico-chimiques de l'écosystème lagunaire

Les facteurs physiques déterminant, précédemment décrits, élaborent progressivement au cours des saisons un environnement lagunaire dont les multiples variantes régionales conditionneront le développement de différents écosystèmes bien particuliers. La description de leurs caractéristiques principales est de deux types : sédimentologique et hydrochimique.

4.2.1 Caractéristiques sédimentologiques des milieux lagunaires

Les lagunes qui se situent toujours dans des régions à très faible relief et par conséquent à sédimentation très active, présentent un matériel détritique abondant non consolidé (EMERY et al., 1957). La sédimentation en lagune est soumise à deux facteurs principaux : l'apport de sédiments terrigènes par les tributaires et la dynamique des eaux lagunaires, et tout particulièrement les courants de marée quand il existent. La sédimentation en lagune se fait alors en profondeur, au sein de la lentille d'eau qui demeure en place au jusant, s'opposant ainsi à l'exportation totale de la charge en suspension vers la mer. Les conditions dynamiques généralement observées en lagune per-

mettent, si l'apport pélitique continental est abondant (ce qui est le cas sous régime tropical), une sédimentation marquée par la dominance des vasières, contrairement aux estuaires (LAFOND, 1967). La tendance est au remaniement permanent de la morphologie des fonds et des chenaux, ainsi qu'au comblement progressif de ces milieux sous l'effet des apports continentaux qui, d'autre part, participent à l'entretien des barrières littorales (PHLEGER, 1969-1981).

Indispensable pour suivre tout mouvement de matière en suspension, la mesure de la turbidité des eaux lagunaires est délicate et nécessite un grand nombre d'échantillons. La turbidité ne varie pas de façon synchrone de la salinité des eaux au cours d'un cycle de marée mais reste très sensible aux moindres échanges avec des eaux marines, même par très faibles courants de marée. Une augmentation très forte est toujours observée en période de crue (LAFOND, 1967). De toute façon la turbidité (variable) des eaux des milieux paraliques, ne semble pas en affecter la structure biologique fondamentale.

Le comportement des particules en suspension à leur entrée en lagune dépend du contact eau douce-eau salée caractéristique de ce type de milieu. En amont, les eaux continentales présentent un milieu plus acide, où les particules et les ions sont dans un état dispersé et dans lequel les processus de sorption particulaire et d'interaction eau-sédiment sont dominants. En lagune, le milieu se stabilisera sous l'effet de l'influence marine. En effet, les particules en suspension subissent très généralement un phénomène de floculation dès leur entrée en lagune, dont le mécanisme dépend moins du type d'argile considéré, que de la turbulence du milieu qui doit être faible et surtout de la salinité des eaux et plus particulièrement de la proportion en sels polyvalents, plus agissants que les alcalins (OTTMANN, 1965 ; LAFOND, 1967 ; MONNET, 1972).

Il semble qu'un seuil de floculation soit très vite atteint pour des taux de salinité assez bas. LAFOND (1967) indique que la floculation apparaît à une salinité voisine de 1,5 $^{o}/oo$, indifféremment pour tous les types d'argiles couramment rencontrés en aval des cours d'eau, ce qui correspond aux observations de URBAIN (1951) et celles de MONNET (1972) sur le Bandama en Côte d'Ivoire (1,8 $^{o}/oo$) ; et celles indiquées par VAN ANDELS et POSTMA (1954) dans le Golfe de Paria (2 $^{o}/oo$). Ces valeurs sont très inférieures à celles indiquées par GLANGEAUD (1939) dans la Gironde (7 $^{o}/oo$) ; et celles indiquées par OTTMANN (1960) dans la région de Récife (15-20 $^{o}/oo$).

D'autre part, il semble que la gamme de salinité comprise entre 1 et 3,5 $^{o}/oo$ en chlorinité et fréquemment rencontrée en amont des milieux lagunaires, corresponde à une zone de transition au niveau de laquelle le comportement des particules en suspension se trouve modifié par le changement de signe des charges électriques développées à la surface des particules, et définies par PRAVDIC (1970) et MONNET (1972). De toute façon, le phénomène de floculation qui apparaît donc très tôt en lagune est suivi d'une décantation progressive des agrégats sur des zones d'atterrissement calmes situées plus en aval.

Enfin, lorsque des conditions dynamiques calmes à faible circulation des eaux sont liées à une salinité très élevée et à un état de confinement, une sédimentation par précipitation évaporitique est fréquemment observée en lagune, et plus particulièrement sous climat aride ou semi-aride. MEDHIOUB (1979) et JEDOUI et al. (1981) en Tunisie.

D'une façon générale la nature et la répartition des sédiments présentent en lagune une beaucoup plus grande variabilité régionale et spatiale que dans le milieu marin, ce qui est lié au fait que la répartition des sédiments, en lagune est le reflet des interactions entre les nombreuses forces hydrodynamiques en présence (PHLEGER, 1969 ; POSTMA, 1981), et le cas échéant, de l'activité biologique des eaux lagunaires.

En effet les zones soumises à un facteur dynamique caractérisé par un niveau énergétique élevé (houle, déferlement, brassage, courants, marée ...) présentent généralement un meilleur classement de sédiments lié à un mode de transport dominant par saltation et inversement (JEDOUI et al., 1981). D'autre part, la zone proximale (aval) d'un milieu lagunaire de taille suffisante se caractérise généralement par une sédimentation biogénique (matière organique, carbonate), tandis que la zone distale (amont) se caractérise par une sédimentation plutôt détritique terrigène.

Enfin, la répartition des différents faciès sédimentaires à l'échelle d'un plan d'eau lagunaire peut avoir d'importantes conséquences dans la répartition écologique de différentes espèces d'organismes benthiques ou fouisseurs, en fonction du degré de compaction du sédiment et de la nature de la végétation induite, mais aussi de la salinité des eaux interstitielles qui permet dans certains cas la remontée très en amont des lagunes, d'espèces d'origine marine (EMERY, 1957).

En ce qui concerne plus spécialement les milieux lagunaires tropicaux, LAFOND (1967) précise que sur les lagunes de Guyane et du Golfe de Guinée, le seuil de floculation semble toujours être atteint, permettant ainsi une sédimentation en milieu floculant, suivie d'une dispersion des agrégats par turbulence.

En début de saison humide, un apport pélitique continental important coïncide avec des conditions dynamiques très calmes dans un milieu lagunaire souvent coupé de la mer et temporairement de type lacustre, mais dans lequel les conditions de floculation semblent toujours réalisées indépendamment d'une salinité inférieure au seuil. Ces conditions sont propices à la sédimentation rapide d'un matériel détritique fin à dominante kaolinite, très riche en matière organique et très sensible aux conditions dynamiques locales, dans un contexte où les conditions physico-chimiques de sédimentation restent plus stables. Dans les lagunes peu profondes il est fréquent que de bonnes conditions de brassage des eaux permettent le développement d'une zone oxydée très épaisse à la surface du sédiment. Il arrive aussi dans le cas contraire que de fortes conditions réductrices au niveau du sédiment conduisent à la formation de pyrite (LAFOND, 1967).

En période de crue, les eaux des tributaires, provenant souvent d'un fort drainage de plaines d'inondation, s'enrichissent en tannins et acides organiques qui procurent temporairement aux lagunes tropicales une couleur brune et des pH faibles (EMERY et al., 1957 ; OTTMANN, 1965). D'autre part, la sédimentation en lagune tropicale n'est jamais de type évaporitique en raison de l'alimentation très importante de ces milieux en eau continentale et des conditions climatiques régionales. La sédimentation est du type sableux ou vaseux avec toute la gamme de faciès intermédiaires, mais toujours de plus en plus abondante et riche en matière organique avec le temps. Au Nigéria et au Bénin, de grandes vasières caractérisent des zones à dynamique calme et la présence de mangroves à proximité des exutoires soumis aux effets de marée, favorise le piégéage supplémentaire de sédiments à l'aval des systèmes. Ultérieurement, le repérage des zonations de la végétation lagunaire aidera à reconstituer la paléo sédimentologie de ces zones à évolution rapide (WEBB, 1958).

Les travaux de TEXIER, COLLEUIL et al. (1979) sur le Lac Nokoué au Bénin, confirment une sédimentation sablo-argileuse, d'origine fluviatile et dont la répartition semble liée aux conditions hydrodynamiques, morphologiques et anthropiques (acadjas) locales. Ces auteurs indiquent une proportion de 20 % de sable, 14 % de vase et 66 % de faciès sablo-argileux intermédiaires, en

entendant par sable et par vase, des sédiments ayant respectivement un minimum de 75 % ou un maximum de 35 % de particules de taille supérieure à 63 microns.

Toute étude sédimentologique complète, d'un milieu lagunaire, doit s'orienter vers la connaissance des régimes locaux de courant, de floculation et de production organique (PHLEGER, 1969).

4.2.2 La qualité hydrochimique des eaux lagunaires

Toute approche de la qualité hydrochimique d'une eau passe par l'étude d'un certain nombre de paramètres qui en décrivent les caractéristiques et les potentialités.

Dans le cas des lagunes, considérées ici comme des milieux naturels non pollués, nous nous limiterons aux caractéristiques de trois types classiques de paramètres abiotiques de la qualité de l'eau : les paramètres physico-chimiques, les ions majeurs et les nutriments.

L'étude des dépendances et de la sensibilité de chaque paramètre considéré met en évidence les facteurs qui le font varier ainsi que sa gamme de variabilité et permet ainsi d'évaluer son importance comme indicateur essentiellement de certains mécanismes de fonctionnement de la lagune : (mélange et renouvellement des eaux, évolutions rythmiques ...), et le cas échéant pour certains paramètres seulement, comme descripteur de certaines potentialités hydrobiologiques du milieu.

a - Les paramètres physico-chimiques

La température des eaux lagunaires, directement soumise aux conditions climatiques locales et aux échanges avec les eaux continentales ou marines, varie tout d'abord selon un rythme journalier :

* sous l'effet des conditions climatique (EMERY et al., 1957 ; SAVOURE, 1977). Ceci est particulièrement vérifié dans le cas des lagunes sous climat tropical pour lequel l'amplitude thermique journalière de l'atmosphère tend à égaler ou parfois dépasser l'amplitude thermique annuelle (TROLL, 1943).
  VOLTOLINA A.L. et D. (1974) indiquent des amplitudes journa-

lières de 2,7°C en été et 0,3°C en hiver sur la lagune de la Restinga au Vénézuela.
KWEI (1977) indique une amplitude journalière de 4°C entre 6 h et 14 h et de 3°C entre 14 h et 18 h sur les lagunes fermées Sakumo et Mukwe au Ghana. TEXIER et al. (1980) sur le Lac Nokoué au Bénin relèvent une amplitude matinale moyenne de 5°C entre 7h30 et 12h30 (25,6°C à 30,6°C).

* sous l'influence des marées : (PHLEGER et al., 1962) sur la lagune Ojo de Liebre au Mexique ; (KWEI, 1977) au Ghana.

La température des eaux varie également selon un rythme saisonnier :

* sous l'effet des saisons climatiques :

. Variations de 14°C à 26°C en valeurs moyennes entre février et août sur la lagune Ojo de Liebre au Mexique, (PHLEGER et al., 1962).
. Variations de 26,4°C à 31,4°C en valeurs moyennes entre février et août sur la lagune de la Restinga au Vénézuela, (VOLTOLINA A.L. et D., 1974).
. Variations de 10°C à 30°C en valeurs maximales entre l'hiver et l'été sur les lagunes du Nord de la Tunisie, (SAVOURE, 1977).
. Variations de 23°C à 31°C en valeurs moyennes entre septembre et mai sur deux lagunes fermées au Ghana, (KWEI, 1977).
. Variations de 27,4°C à 31,2°C en valeurs moyennes entre août et avril sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, (DURAND et SKUBICH, 1982).

* sous l'effet de "saisons marines" :

. DURAND et SKUBICH (1982) rappellent l'influence saisonnière des "upwelling" marins connus le long du Golfe de Guinée de décembre à janvier et de juillet à octobre, qui refroidissent temporairement les eaux littorales et provoquent un important gradient vertical de température dans les lagunes ivoiriennes (6°C), (MORLIERE, 1970 ; PAGES et al., 1979).

. KWEI (1977) au Ghana indique le refroidissement des eaux de la lagune ouverte de Sakumo à proximité de son exutoire (température maximale : 28°C).

. MEDHIOUB (1979) sur le Bahiret el Biban en Tunisie indique l'influence régulatrice des incursions occasionnelles d'eau marine qui rafraîchissent les eaux lagunaires.

* sous l'effet des variations de salinité (variation de capacité calorifique des solutions).

La température est le plus souvent homogène sur toute l'épaisseur de la tranche d'eau et les lagunes sont fréquemment considérées comme des milieux oligomictiques, en raison de leur faible profondeur et d'un bon brassage des eaux qui détruit la thermocline et peut être dû à des effets journaliers de convection thermique (HILL et WEBB, 1958 sur la lagune de Lagos ; PHLEGER et al., 1962 sur la lagune de Ojo de Liebre au Mexique) et aux effets mécaniques des vagues et des courants (MINAS, 1977 sur l'étang de Berre ; TEXIER et al., 1979 sur le Lac Nokoué au Bénin).

La teneur des eaux lagunaires en oxygène dissous est directement liée à l'action des processus externe et interne au milieu.

Les eaux de précipitation sont saturées et les eaux de ruissellement et d'écoulement dans les tributaires le sont également si elles ne sont pas très enrichies en matières organiques. Les eaux marines sont saturées à l'exception des eaux profondes qui peuvent remonter en lagune temporairement sous l'effet des "upwelling". Les conditions climatiques et hydrodynamiques locales influencent dans une large mesure et de façon journalière l'oxygénation des eaux lagunaires : pression atmosphérique, température, brassage mécanique et renouvellement des eaux. Enfin, l'équilibre entre la photosynthèse et la respiration des organismes planctoniques, dépendant des conditions d'insolation, de la salinité et de la turbidité des eaux, ainsi que les processus de minéralisation de la matière organique en profondeur, contrôlent l'oxygénation des eaux et induisent de très fortes variations journalières et spatiales. VOLTOLINA A.L. et D., (1974) sur la lagune de la Restinga au Vénézuela, insistent sur la dominance des facteurs biologiques dans le contrôle de l'oxygénation des eaux. SAVOURE (1977) en Tunisie indique le rôle de la qualité des apports au milieu dans l'équilibre entre photosynthèse et minéralisation.

D'une manière plus générale, DURAND et SKUBICH (1982) sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire souligne la grande variabilité spatiale et temporelle (nychtémérales et saisonnière) des conditions d'oxygénation des eaux lagunaires sous l'effet des nombreux paramètres cités. Une telle variabilité doit inciter à ne considérer dans toute comparaison entre différentes lagunes, que les mesures des teneurs en oxygène dissous diurnes effectuées à proximité de la surface.

L'oxygénation verticale de la tranche d'eau dépend surtout des effets de brassage et de renouvellement des eaux, qui masquent bien souvent les effets biologiques. Tout déficit de ce brassage dynamique des eaux sous l'effet de variations hydroclimatologiques ou de profondeur favorisant la stratification des eaux avec apparition de picnocline, se traduira par une désoxygénation rapide conduisant souvent à l'anoxie des couches profondes, accompagnée du dégagement d'hydrogène sulfuré (EMERY et al., 1957 ; DURAND et SKUBICH, 1982). PAGES et al., 1979 observent le 25 mai 1979 à l'ouest de la lagune Ebrié une saturation de 150 % en surface de 0 à 3 mètres et des conditions voisines de l'anoxie à partir de 5 mètres de profondeur.

La mesure de pH des eaux permet en lagune de caractériser ce milieu par rapport au milieu fluviatile continental plus acide et au milieu marin plus basique mais ne permet en aucune façon la compréhension de la circulation des masses d'eau dans la lagune (LAFOND, 1967).

Le pH des eaux lagunaires varie tout d'abord de façon importante selon un rythme saisonnier :

* sous l'effet du balancement saisonnier des eaux continentales et marines

  . DAGET et DURAND (1968) relèvent en baie de Cocody sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire (zone sous influence marine) des variations de pH entre les valeurs extrêmes de 6,5 et 8,5 avec une chute brutale du pH en mai, au début de la saison humide, ainsi qu'une excellente corrélation avec les variations synchrones de la salinité des eaux.
  . TEXIER et al. (1980) sur le Lac Nokoué au Bénin indiquent des valeurs extrêmes de 6,5 et 8,1 respectivement en mai et octobre 1979, avec une chute brutale du pH dès les premières pluies du mois de mai, puis ensuite au moment des crues d'août à octobre.

* sous l'effet des précipitations géochimiques

. MEDHIOUB (1979) sur le Bahiret el Biban en Tunisie met en évidence une augmentation graduelle du pH vers l'amont du bassin lagunaire, sous l'effet de l'influence croissante des eaux continentales décalcifiées qui induisent localement la dissolution de la calcite.

Le pH des eaux lagunaires varie également de façon non négligeable selon un rythme journalier :

* sous l'effet de l'alternance des processus de phothosynthèse et de respiration

. EMERY et al. (1957) ; LAFOND (1967) ; MEDHIOUB (1979) indiquent des amplitudes journalières de pH supérieures a 1 unité en milieu margino-littoral.
. VARLET (1978) relève en baie de Koumassi-est sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire (zone abritée) des variations du pH entre 7,6 à 8 heures et 8,24 à 18 heures, ainsi qu'une excellente corrélation avec l'évolution synchrone des teneurs en oxygène dissous.
. CARPELAN (1969) indique des valeurs du pH de l'ordre de 9 et jusqu'à 10,3 en milieu de journée sur les lagunes du sud de la Californie.

Par contre, des valeurs de pH exceptionnellement faibles sont parfois rencontrées localement en lagune sous l'effet d'une distrophie provoquée par un enrichissement organique ponctuel (rejets, enclos, cité lacustre ...).

. VARLET (1978) en lagune Ebrié dans la région de Dabou (pH<6).
. CARPELAN (1969) sur les lagunes San Elijo et Del Mar en Californie.

* sous l'effet du balancement des courants de flot et de jusant en lagune ouverte (LAFOND, 1967).

b - La salinité des eaux lagunaires

* La salinité des eaux, exprimée globalement, est certainement le paramètre dont la grande variabilité en lagune reflète le mieux les influences sur le milieu de la provenance, de la périodicité et du volume des apports en eau continentale et marine , de l'influence de la morphologie et de la bathymétrie lagunaire (embaiement, chenaux, cloisonnement ...) et de l'influence des conditions climatiques de précipitation et d'évaporation locales. La salinité apparaîtra donc souvent sur les plans d'eau de petite taille comme un bon indicateur du degré d'échange avec la mer ou de confinement et plus précisément de la dynamique de circulation des eaux en lagune (PHLEGER et al., 1962).
Les variations de la salinité des eaux lagunaires seront donc principalement de trois types : régionales, saisonnières et verticales.

* La mesure de la salinité peut être envisagée de plusieurs façons :

Tout d'abord par l'estimation de la charge saline globale par séchage, ou par cumul de la composition ionique des eaux (S $^{o}/oo$).

Mais également par dosage de l'ion chlorure présumé conservé en eau hypersalée. La chlorinité ($^{o}/oo$) d'une solution saumâtre variant linéairement avec la salinité globale des eaux :

$S\ (^{o}/oo) = 1{,}805\ Cl(^{o}/oo) + 0{,}03$: SVERDRUP et al. (1942)

$S\ (^{o}/oo) = 1{,}85\ Cl(^{o}/oo) - 0{,}3$: EMERY (1969) sur Oyster Pond au Cap Cod (USA)

$S\ (^{o}/oo) = 1{,}814\ Cl(^{o}/oo)$: MILLERO (1974) sur l'eau de mer

$S\ (^{o}/oo) = 1{,}810\ Cl(^{o}/oo)$: FERNENDEZ et al. (1982) sur la lagune Apozahualco au Mexique.

La salinité peut aussi être mesurée par la conductivité des eaux, à l'aide de fonctions polynomes. La relation entre la salinité globale obtenue par l'intermédiaire de la conductivité et la chlorinité rejoint pour certains auteurs les formules précédentes :

$Scond(^{o}/oo) = 1{,}8066\ Cl(^{o}/oo)$: KRUMGALTZ (1980) dans le Sinaï

$Scond(^{o}/oo) = 1{,}8067\ Cl(^{o}/oo) \pm 0{,}0005$: FERNENDEZ (1982) au Mexique

proche de celle de l'eau de mer étalon :

$Scond(^{o}/oo) = 1{,}80655\ Cl(^{o}/oo)$

Enfin, il est parfois pratique d'exprimer la salinité des eaux lagunaires saumâtres ou hypersalées issue d'une dilution ou concentration d'eau de mer, directement en pourcentage d'eau de mer, ce qui permet d'évaluer grossièrement l'évolution du degré de confinement d'un milieu paralique de faible dimension (BAUDIN, 1980).

Nous utiliserons dans ce qui suit, après en avoir rappelé la définition, la notion de "Salinité Pratique 78", indépendant de la chlorinité, et établie à partir d'un étalon synthétique de KCl.

* La classification des eaux lagunaires est très délicate devant l'extrême variabilité régionale, spatiale, saisonnière et même interannuelle de ce type de milieu.

DAHL (1956) envisage une première classification précisément sur ce critère de variabilité entre les eaux homoïohalines de salinité homogène et constante qui sont les eaux douces ou marines et les eaux poïkilohalines qui présentent de grandes variations de salinité, qui sont les eaux saumâtres ou hypersalées.

AGUESSE (1957) précise la classification des eaux poïkilohalines et introduit des catégories établies à partir des gammes de valeurs de salinité moyenne et des types fondés sur l'étendue de l'amplitude des variations extrêmes de la salinité des eaux.

Les catégories sont :

- eau oligo-saumâtre : salinité moyenne de 0,5 à 5 °/oo
- eau saumâtre : salinité moyenne de 5 à 16 °/oo
- eau poly-saumâtre : salinité moyenne de 16 à 40 °/oo
- eau salée : salinité supérieure à 40 °/oo

Les types sont :

- type oligo-poïkilohalin : le maximum et le minimum de salinité se situent dans la même catégorie.
- type méso-poïkilohalin : le maximum et le minimum de salinité sont dans deux catégories adjacentes.
- type poly-poïkilohalin : le maximum est situé dans deux catégories au-dessus du minimum.

La classification du symposium de Venise (1958) couramment utilisée depuis et plus particulièrement adaptée au domaine méditerranéen, modifie le découpage des catégories précédentes :

- eau limnique	à salinité de	0	à	0,05 g/l
- eau oligohaline	à salinité de	0,05	à	5,00 g/l
- eau mésohaline	à salinité de	5,00	à	18,00 g/l
- eau polyhaline	à salinité de	18,00	à	30,00 g/l
- eau euhaline	à salinité de	30,00	à	40,00 g/l
- eau hyperhaline	à salinité supérieure		à	40,00 g/l

D'une manière générale, toute classification atteint ses limites lorsque la variation de salinité s'étend sur plusieurs catégories, ce qui conduit parfois à effectuer un découpage du milieu en zones homogènes ne recouvrant qu'une seule catégorie de salinité précédente (PETIT, 1962 in LEVY (1971) ; SEYLER, 1980).

* Les nombreuses études lagunaires effectuées dans différentes régions du globe soulignent les influences des conditions dynamiques locales et surtout des conditions climatiques régionales sur la gamme des valeurs et l'amplitude des variations de la salinité des eaux :

+ Tout d'abord, c'est un régime d'évaporation intense qui peut conditionner à la fois la dynamique et la qualité des eaux lagunaires (et plus particulièrement sous climat aride ou semi-aride) :

- Sur la côte sud de Californie, en milieu fermé, des amplitudes annuelles de 2 °/oo à 96 °/oo (CARPELAN, 1969).
- Dans le Golfe Persique, en milieu semi-ouvert des amplitudes annuelles de 42 °/oo à 66 °/oo (EVANS et BUSH, 1969).
- Sur la lagune Ojo de Liebre au Mexique, des variations essentiellement saisonnières homogènes dans l'espace, conditionnées par l'évaporation mais limitées par l'influence légère des marées, maximum annuel 46 °/oo (PHLEGER et al., 1962).
- De même sur la lagune de la Restinga au Vénézuela, où l'amplitude varie de 29 °/oo en août-septembre, à 45 °/oo en mars, sous l'effet conjugué de l'évaporation et des marées (VOLTOLINA A.L. et D., 1974).

- Sur le Bahiret el Bou Grara, en Tunisie, en système ouvert, l'influence des marées devient dominante mais avec une nette augmentation de salinité en fin de jusant due à la forte évaporation locale. En marée de vive-eau, maximum de 45 °/oo en fin de flot, et de 48 °/oo en fin de jusant (JEDOUI et al., 1981).

+ D'autre part, c'est un régime de précipitation très importantes qui peut conditionner à la fois la dynamique et la qualité des eaux lagunaires (et plus particulièrement sous climat tropical).

- En Côte d'Ivoire, sur la lagune Ebrié, dans la région d'Abidjan soumise aux influences des marées, l'amplitude annuelle varie entre 20 - 30 °/oo en saison sèche, de janvier à avril et 2 - 3 °/oo en surface de juin à septembre, sous l'effet des crues (DURAND et SKUBICH, 1982).
- Au Nigéria, en système ouvert, au niveau de la lagune de Lagos, l'amplitude annuelle varie de 30 °/oo à 8 °/oo à l'embouchure sur la mer et de 20 °/oo à moins de 1 °/oo dans la lagune, avec une chute très brutale de la salinité au mois de mai, dès les premières pluies. La seconde saison des pluies d'octobre se traduit immédiatement par une baisse sensible de la salinité dans la lagune de Lagos ; d'autre part, en milieu fermé, au niveau de la lagune voisine de Kuramo, séparée de la mer par un cordon littoral sableux fermé, l'amplitude annuelle ne varie plus qu'entre 13 °/oo et 24 °/oo par double atténuation des effets de marée et de crue (HILL et WEBB, 1958).
- De même au Ghana, en système fermé, dans la lagune de Sakumo II, l'amplitude annuelle varie entre 10 °/oo en juin 30 °/oo en août et 60 °/oo en décembre sous l'effet de l'évaporation, mais avec une chute très rapide en mai sous l'effet des pluies ; en système semi-ouvert, dans la lagune de Sakumo I, lorsque le cordon littoral sableux s'ouvre temporairement sous la pression des crues, l'amplitude de la salinité reflète à nouveau l'alternance des influences continentales et marines et varie entre 2 °/oo en avril à 12 °/oo un mois après l'ouverture du cordon sur la mer, 35 °/oo trois mois après et 65 °/oo huit mois après au fond de la lagune sous l'effet temporaire et local d'une forte évaporation (KWEI, 1977).

- Au Bénin, enfin, l'observation de la salinité des eaux sur le Lac Nokoué au cours de la succession des dernières phases d'ouverture et de fermeture du chenal de Cotonou, confirme bien l'importance, en climat tropical, des effets des crues et du régime d'évaporation modeste, provoquant un abaissement relatif des extremum de salinité en lagune mais aussi l'importance du régime des ouvertures de ces milieux sur la mer, provoquant une augmentation de l'amplitude des variations saisonnières de salinité : amplitude de salinité globale de 0 à 33 g/l avant la fermeture du chenal de Cotonou en 1978 , amplitude réduite de 6 à 10 g/l à partir de la fermeture du chenal en mai 1978 , amplitude de 0 à 20 g/l après la réouverture artificielle du chenal en août 1979 (TEXIER et al., 1980).

Les variations spatiales, verticales et saisonnières de la salinité des eaux en lagune, sous l'effet des facteurs climatiques, dynamiques ou morphologiques cités précédemment, conduisent souvent à une stratification verticale ou bien à une partition régionale des eaux lagunaires, de façon permanente ou saisonnière, ce qui peut avoir d'importantes conséquences dynamiques et hydrobiologiques.

PHLEGER et al. (1962) notent sur la lagune Ojo de Liebre au Mexique l'importance des courants de densité et de la circulation thermo-haline des eaux lagunaires.

GROEN (1969) décrit les deux types de circulation laminaire, observés aux exutoires lagunaires : le type anti-estuarien lorsqu'un courant de surface est orienté vers la lagune et un courant de fond vers la mer et le type estuarien, plus fréquemment observé, et noté par DURAND et SKUBICH (1982) en lagune Ebrié, lorsque les courants de surface et de fond s'orientent respectivement vers la mer et vers la lagune.

Les conséquences d'ordre biologique sont essentiellement de deux types : la répartition spatio-temporelle des expèces sédentaires ou migratrices en lagune et la productivité de ces milieux poïkilohalins (EMERY et al., 1957 aux Etats Unis ; PLIYA, 1980 au Bénin).

PHLEGER et al. (1972) relèvent des zonations de différentes espèces de Foraminifère dans les lagunes ouvertes de Yavaros et de Huizache-Caimanero au Mexique, indicatrices de différents degrés de confinement des eaux lagunaires.

PHLEGER et al. (1969-1972) au Mexique ; CARPELAN (1969) en Californie ; KWEI (1977) au Ghana observent, par rapport aux milieux continentaux, une productivité organique favorisée en milieu soumis à de fortes variations de salinité, mais à mettre en liaison avec des échanges favorisés avec la mer et le cas échéant, avec les tributaires (oxygène - nutrients - phytoplancton, etc...).

DUFOUR et al. (1981) ; DURAND et SKUBICH (1982) précisent sur la lagune Ebrié, en Côte d'Ivoire, l'importance des zones occidentales, très stables, fortement dessalées, éloignées des exutoires sur la mer et marquées par une beaucoup plus grande productivité primaire que les zones aval "estuariennes" soumises aux marées, ce qui peut être mis en relation avec les conditions dynamique stables et de température plus élevée des eaux en ces zones "amont", abritées, qui bénéficient à la fois des apports continentaux et marins.

Par contre, en milieu hypersalé, EVANS et BUSH (1969) constatent dans les lagune du Golfe Persique une pauvreté biologique chronique. La raréfaction spécifique dans ces milieux soumis à des conditions limites, s'accompagne classiquement d'une prolifération des effectifs.

c - Les teneurs ioniques des eaux lagunaires

Selon les régimes des apports, de la circulation et de l'évaporation locales, les eaux lagunaires présentent des compositions ioniques variables qui peuvent varier dans des proportions identiques à celles de l'eau de mer avec des phénomènes de dilution ou de concentration mais qui peuvent également subir de profondes modifications sous l'effet d'apports externes et de précipitations géochimiques éventuellement susceptibles de conférer aux eaux lagunaires leur originalité par rapport à l'eau de mer.

Il apparaît tout d'abord que l'ion chlorure, très répandu et dont l'origine est souvent délicate à déterminer avec précision, reste parmi les moins sollicités par les phénomènes de précipitations, d'échange cationique et de réduction bactérienne (IAEA, 1968). Le chlorure précipite cependant à des

concentrations élevées avec le sodium sous forme de halite avec possibilité fréquente de redissolution par les eaux de ruissellement (MEDHIOUB, 1979 en Tunisie) et, d'autre part, d'importantes intrusions d'eau de mer induisent de grandes fluctuations saisonnières des teneurs en chlorure (SAVOURE, 1977 en Tunisie). Toutefois, dans la comparaison des eaux lagunaires avec l'eau de mer, les rapports des différentes teneurs ioniques seront souvent rapportées à la chlorinité.

L'ion potassium et l'ion magnésium présentent également une très grande stabilité en milieu lagunaire vis à vis de tous les processus géochimiques. Le potassium ne participe qu'à des précipitations d'argile, même dans les saumures interstitielles des Sebkhas (MEDHIOUB, 1979 sur le Bahiret el Biban en Tunisie ; ARAKEL, 1981 sur les lagunes Hutt et Leman de la côte ouest en Australie). Le magnésium ne participe à des précipitations qu'à des concentrations très élevées (magnésite, huntite, giobertite) (MEDHIOUB, 1979) ; mais FERNANDEZ et al. (1982) notent sur la lagune hypersalée d'Apozahualco au Mexique une légère coprécipitation de potassium et de magnésium avec le gypse (polyhalite).

La comparaison de la composition ionique des eaux lagunaires avec celle de l'eau de mer est importante pour apprécier le degré de confinement du milieu et peut être envisagée par l'intermédiaire de la salinité des eaux exprimée en pourcentage d'eau de mer, dans les milieux à faibles transformations ioniques, mais passe toujours par l'étude comparée de rapports ioniques, dans les milieux moins stables.

La première hypothèse selon laquelle les composants majeurs de l'eau de mer varient dans des proportions constantes a été émise par MACET (1819), puis confirmée depuis par un grand nombre d'auteurs dont RILEY et TONGUDAY (1967) qui présentent une étude comparée sur différents océans des rapports des cations majeurs ramenés à la chlorinité. MEDHIOUB (1979) en Tunisie compare l'évolution de la composition des eaux du Bahiret el Biban par rapport à l'eau de mer, en effectuant pour chaque ion, le rapport entre le rapport de la teneur ionique ramenée à la chlorinité établi en lagune et celui établi pour le même ion en mer, en en suivant ses variations autour de la valeur 1. Enfin, LEVY (1977) profite du caractère plus ou moins conservé du magnésium en lagune pour l'introduire dans un coefficient d'enrichissement E défini comme le rapport de la teneur en magnésium de l'eau lagunaire ramenée au standard de l'eau de mer, exprimée en mole par millier de moles d'eau (ARAKEL, 1981).

ARAKEL (1981) interprète des valeurs élevées du rapport sodium sur chlorure voisines de 0,9 et 1, comme une intrusion marine dans les lagunes Hutt et Leman en Australie.

EMERY et al. (1957) considèrent que les ions calcium, sulfate et carbonate sont les plus instables en lagune et calculent les rapports : calcium sur sodium, sulfate sur chlorure et carbonate sur chlorure. Une vidange d'eau continentale en lagune ou des précipitations de calcite ou de gypse s'accompagnent respectivement d'une augmentation ou d'une diminution de ces rapports.

MEDHIOUB (1979) sur le Bahiret el Biban en Tunisie constate de grandes variations de calcium, géographiques et saisonnières, en relation avec les réactions de précipitation de calcite et de gypse.

FERNENDEZ et al. (1982) sur la lagune hypersalée d'Apozahualco au Mexique et KRUMGALTZ et al. (1980) sur la lagune hypersalée de Bardawil dans le Sinaï, constatent respectivement des valeurs du rapport calcium sur chlorure de $104,6 \pm 0,7.10^{-5}$ et $98,7 \pm 3,3.19^{-5}$, marquant un net déficit de calcium dans ces eaux hypersalées (chlorinité supérieure à 50 °/oo), par rapport à l'eau de mer.

A une chlorinité de 50 °/oo (salinité totale voisine de 90 °/oo), FERNENDEZ et al. (1982) indiquent au Mexique une précipitation de 7,5 millimoles/kg de gypse ; et BORCHERT (1965) précise que cette valeur de salinité constitue un seuil à partir duquel la précipitation de gypse devient dominante.

BAUDIN (1980) sur l'étang de Citis remarque un effet inverse d'enrichissement des eaux lagunaires en calcium par rapport à l'eau de mer, consécutivement à une période d'isolement.

La teneur en ion bicarbonate présente généralement en lagune d'importantes et de fréquentes fluctuations sous le double effet des mécanismes de précipitation ou dissolution de calcite et des mécanismes de photosynthèse ou de minéralisation de la matière organique et SAVOURE (1977) indique en été sur les lagunes nord tunisiennes une baisse des teneurs en bicarbonate en aval des lagunes sous l'effet de l'activité phytoplanctonique et une augmentation simultanée en amont sous l'effet de la minéralisation de la matière organique. MEDHIOUB (1979) considère l'ion bicarbonate comme un bon traceur de l'âge des eaux sur le Bahiret el Biban en Tunisie.

d - Les teneurs en nutriments dans les eaux lagunaires

Les nutriments représentent les molécules minérales ou organiques, à base d'azote et de phosphore, ainsi que la silice, qui sont directement prélevées sous forme minérale dissoute dans les eaux lagunaires, par les organismes phytoplanctoniques au cours de leur métabolisme, pour être à l'origine du développement de toutes les chaînes trophiques, jusqu'à leur migration hors du système ou bien leur relibération au sein du système sous forme organique après la disparition de ces organismes, avant de subir une reminéralisation bactérienne. Le cycle de l'évolution des nutriments dans un milieu naturel conditionne la potentialité biologique de ce milieu, qui peut être approchée classiquement par la connaissance du comportement de quelques paramètres chimiques tels que la silice dissoute (SiO_2), l'azote ammoniacal (NH_4^+), l'ion nitrite (NO_2^-), l'ion nitrate (NO_3^-) et l'ion orthophosphate (PO_4^{3-}), ainsi que les teneurs en azote total, phosphore organique dissous et phosphore organique particulaire (planctonique ou détritique).

Les teneurs en nutriments des eaux lagunaires sont soumises à de très importantes fluctuations spatiales, saisonnières, voire interannuelles, en fonction :

- du régime, du volume et de la qualité des apports en eau météoriques et continentales ;
- du régime des échanges avec la mer ;
- de l'ampleur des activités de synthèse organique et de minéralisation dans le milieu ;
- des phénomènes de sorption et de désorption sédimentaire ;
- des effets de stratification verticale des eaux.

Les milieux lagunaires jouent généralement un rôle de transformateur des éléments minéraux terrigènes ou d'origine marine, par l'intermédiaire d'une activité biologique intense, avant leur exportation progressive sous différentes formes organique vers la mer. Dès que les conditions de circulation deviennent insuffisantes, une sédimentation organique très importante conduit rapidement à une dégradation anaérobique du milieu (ROCHFORD, 1951 ; EMERY et al., 1957 ; NIXON et al., 1981 ; MANDELLI, 1981).

MANDELLI (1981), sur les lagunes de la côte pacifique au Mexique, insiste sur l'importance fondamentale des apports précipités et ruisselés dans l'alimentation en nutriments des lagunes au cours des périodes de crue :

* La dynamique annuelle de la lagune semi-ouverte de Chautengo se découpe en quatre phases successives :

- une phase d'isolement à l'étiage marquée par une utilisation du stock de nutriments en lagune.
  P total dissous : 2,4 à 3 µatg/l
  N total dissous : 1,5 µatg/l
  SiO_2 dissoute : 75 à 100 µatg/l

- une phase de remplissage sous l'effet des crues qui s'accompagne d'une forte augmentation des teneurs en nutriments.
  P total dissous : 3,2 µatg/l
  N total dissous : 2,4 µatg/l
  SiO_2 dissoute : 120 µatg/l
  Les apports en provenance des zones d'inondation en bordure paraissent, en outre, plus importants que les apports directs des tributaires.

- une phase de vidange en mer après l'ouverture du cordon littoral, marquée par une baisse brutale des teneurs en phosphore et en silice dissoute :
  P total dissous : 2,8 µatg/l
  N total dissous : 5,2 µatg/l
  SiO_2 dissoute : 50 µatg/l

- une phase d'échange prolongée avec la mer, marquée par un appauvrissement progressif en azote, phosphore et silice.
  Le cycle annuel des nutriments en lagune de Chautengo coïncide avec le régime d'exportation rapide et saisonnière du matériel continental vers la mer.

* Sur les lagunes de Mitla et San Marcos, les périodes de fermeture prolongée du cordon littoral provoquent une accumulation de nutriments en lagune qui s'accompagne d'un bloom phytoplanctonique conduisant à des phénomènes d'anoxie journalière ou permanente en cas de stratification des eaux et en lagune Mitla, d'autre part, il arrive qu'un équilibre annuel se produise entre les apports terrigènes de nutriments et leur sédimentation en lagune.

PAGES et al. (1979) mettent également en évidence sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire l'importance des apports continentaux par les tributaires dans l'alimentation des eaux lagunaires en azote et phosphore. En effet, les zones de débouchés des tributaires dans la lagune sont appauvries en azote et phosphore au cours de l'étiage par rapport au chenal central soumis à une influence marine (plus ou moins atténuée). Les teneurs augmentent et de façon homogène sur l'ensemble du plan d'eau en période de crue.

La gamme des teneurs en phosphate dissous varie entre 0,3 et 1,4 µatg/l et des teneurs en nitrate varient entre des valeurs inférieures à 2 µatg/l à l'étiage et des valeurs voisines de 10 µatg/l en saison des pluies dans les zones bien alimentées par les tributaires.

Des zones extrêmes apparaissant généralement déssalées sont très appauvries en nutriment sous l'effet probable d'apports terrigènes limités et d'une production organique intense ; des zones confinées limitées dans l'espace sont au contraire très riche en nutriment et présentent une anoxie permanente en profondeur (teneurs supérieures à 30 µatg/l en phosphate dissous dans la cuvette centrale de la lagune Aby en juillet 1975 (DURAND et SKUBICH, 1982).

BOUTIERE (1974) sur l'étang de Bages-Sigean ; BAUDIN (1980) sur l'étang de Citis ; WALKER (1982) sur la Grande Barrière en Australie, confirment l'importance des précipitations et des eaux de ruissellement continentales dans l'alimentation du milieu lagunaire en azote, phosphore et silice. WALKER (1982) présente les teneurs en silice en corrélation inverse avec la salinité des eaux en période de faible brassage. BAUDIN (1980) insiste en outre sur le rôle des échanges avec le sédiment dans les fluctuations saisonnières des teneurs en phosphore. SAVOURE (1977) sur les lagunes nord tunisiennes met en évidence deux facteurs dominants dans l'alimentation du milieu en nutriments : le lessivage des berges par les eaux de ruissellement, conduisant à des pics de teneurs en nitrate et phosphate et les processus de minéralisation automnale conduisant à une nette augmentation des teneurs en phosphate (pic jusqu' à 50 µg/l de phosphate dans les lagunes Ischkeul et Farina en octobre et novembre). SAVOURE (1977) et BAUDIN (1980) soulignent l'importance du pic de développement des diatomées (Bacillariophycées) aux mois de mai et octobre dans la baisse correspondante des teneurs en silice des eaux lagunaires sous climat méditerranéen.

On prend donc généralement l'habitude de considérer les milieux lagunaires comme des zones de transformation et d'exportation de matériel terrigène, mais les lagunes sont également tributaires dans un grand nombre de cas des apports marins en éléments minéraux dissous et en nutriments et c'est tout particulièrement le cas pour les lagunes côtières à petit bassin versant et soumises en cas d'ouverture à une influence marine importante.

NIXON et al. (1981) montrent que la lagune de Charleston et Green Hill sur la côte Sud du Rhode Island (USA), se comporte comme un milieu exportateur vers la mer d'azote et de phosphore sous forme réduite organique et à majorité particulaire et importateur d'azote et de phosphore inorganique sous forme oxydée, à dominance de nitrate et de phosphate dissous, en provenance de la mer.

(importation : 85 µatg/l de NO_3^- et 0,9 µatg/l de NH_4^+)
(exportation : 0,4 µatg/l de NO_3^- et 15,2 µatg/l de NH_4^+)

Pour l'azote, comme pour le phosphore, le taux de l'exportation organique dissoute ou particulaire domine de 50 % celui des importations de matériel minéral en provenance de la mer.

La majeure partie de ce transfert vers la lagune s'effectue en hiver en période d'activité biologique ralentie, ce qui conduit à un cycle de nutriment typique du milieu lagunaire et inverse de celui observé en mer, marqué par une forte augmentation des teneurs en fin de printemps et en été.

D'autre part, il apparaît qu'une grande proportion de phosphate ne participe pas à l'activité biologique en lagune mais soit captée par les sédiments ou remaniée dans des réactions avec le fer.

VOLTOLINA A.L. et D. (1974) sur la lagune de la Restinga, au Vénézuela, avaient mis en évidence également le rôle des apports marins en nutriments sous l'effet des "upwellings" côtiers. De même PHLEGER (1981) à partir de ses observations des lagunes mexicaines, précise qu'à partir du moment où un milieu lagunaire est ouvert à une influence marine, il devient plus riche en nutriments, et CROMWELL (1975), sur les mêmes milieux, avait toujours rapproché une baisse observée de la productivité d'une lagune, avec un ralentissement de ses échanges avec la mer.

La répartition spatiale des nutriments en lagune dépend des conditions morphologiques et bathymétriques du milieu, ainsi que des conditions de circulation, de brassage ou de stratification des eaux. Ainsi MINAS (1975) sur l'étang de Berre ; OBENG (1977) sur le Lac Volta au Ghana ; MANOLELI (1977) sur le Lac Belona en Mer Noire ; OKUDA (1981) sur la lagune Tacarigua au Vénézuela ; DURAND et SKUBICH (1982) sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, indiquent des conditions d'eutrophisation marquée en profondeur sous l'effet d'une stratification des eaux qui peut être parfois remise en cause temporairement par l'action des vents (MINAS, 1975) ou d'intrusions marines (MANOLELI, 1977).

Il apparaît donc que la richesse d'un milieu lagunaire en nutriments, conditionnant toute l'activité de productivité organique du milieu, soit sous l'étroite dépendance des conditions d'alimentation en eau, de sédimentation et de l'intensité de ces activités biologiques elles-même, dans le milieu ; Les principales conditions d'une bonne potentialité biologique d'un milieu lagunaire sont de deux types :

- des apports continentaux importants,
- des échanges saisonniers avec la mer (MANDELLI, 1981).

Une telle situation, qui caractérise d'ailleurs un milieu lagunaire typique, permet de réaliser un approvisionnement équilibré du milieu en ses facteurs limitants que sont l'azote et le phosphore car, comme l'indique DUFOUR (1981) en Côte d'Ivoire, c'est l'azote qui apparaît comme l'élément nutritif principal limitant en zone sous influence marine dominante, et c'est le phosphore en zone soumise à une influence continentale dominante.

Le balancement saisonnier entre influences marines et continentales en lagune exige l'ouverture de ce milieu et des conditions d'échange suffisant avec la mer, ce qui présente en outre le double avantage préventif contre les inondations prolongées des marges et l'eutrophisation des eaux.

Conclusions :

Cet ensemble bibliographique, bien qu'encore très incomplet, tente de dégager les quelques traits fondamentaux qui caractérisent les milieux lagunaires et leur fonctionnement quelle que soit leur situation géographique et qui permettent de considérer ces milieux "paraliques" comme des écosystèmes originaux à part entière.

Trois caractéristiques apparaissent essentielles :

- la géomorphologie du milieu margino-littoral qui a valeur systématique et qui intègre à la fois les conditions géologiques historiques qui ont été à l'origine de sa formation et l'ensemble de sa dynamique actuelle intervenant de façon réversibles (cordon littoral) ou irréversible (sédimentation).

- la grande variabilité, journalière, saisonnière ou interannuelle du milieu lagunaire, qui intègre les interactions permanentes au sein de ce milieu des cycles journaliers et saisonniers continentaux et marins. Une "saison lagunaire" intègre à la fois l'influence hydroclimatologique d'une "saison continentale" (ensoleillement, précipitations, crues) et la contrainte hydrochimique et dynamique d'une "saison marine" (amplitude des marées, upwelling).

- la productivité organique très importante de ce milieu très particulier, qui se distingue des écosystèmes continental et marin.

5 - LES MILIEUX LAGUNAIRES EN ZONE INTERTROPICALE

5.1 Un environnement particulier

La dynamique des milieux lagunaires est, comme nous l'avons vu précédemment, sous la dépendance d'un certain nombre de contraintes de milieu déterminantes, qui présentent, sous les basses latitudes, les quelques caractéristiques suivantes :

* L'environnement hydroclimatologique de ces milieux en zone intertropicale est marqué par :

- un fort ensoleillement avec toutefois d'importants effets de nébulosité à proximité des régions équatoriales, sans contraste saisonnier notable et accompagné toute l'année d'une assez forte humidité atmosphérique, tout particulièrement en ce qui concerne les régions côtières sous climat équatorial de transition (U > 50 %).

- une température atmosphérique modérément élevée et très stable au cours de l'année ; les amplitudes journalières de quelques degrés excédant souvent l'amplitude annuelle (TROLL, 1943).

- enfin, un régime de précipitation très élevée (hauteur annuelle précipitée supérieure à 1000 mm) et excédentaire sur celui de l'évaporation, ce qui influencera largement la dynamique et la physico-chimie des eaux lagunaires. WEBB (1958) au Nigéria ; GUILCHER (1959) et TEXIER et al. (1979) au Bénin ; REINHOLD et al. (1967) ; MANDELLI (1981) et NICHOLS et al. (1981) au Mexique ; DURAND et CHANTRAINE (1982) en Côte d'Ivoire, insistent sur le rôle fondamental en zone intertropicale du régime des précipitations, qui conditionnent à la fois la circulation et les grandes variations saisonnières de la qualité des eaux lagunaires sous l'effet du balancement saisonnier des crues et des étiages, typiques dans ces milieux et de l'importance du rôle de dilution, mais aussi d'apport en matière dissoute et solide des eaux d'écoulement des tributaires, de ruissellement et de précipitation directe sur le plan d'eau.

Les plus basses latitudes de l'hémisphère nord (milieux côtiers du Golfe de Guinée : 4-6° N, par exemple), se caractérisent par un fort ensoleillement sous nébulosité, un régime de précipitation maximal largement excédentaire sur les évaporations et un taux d'érosion continentale maximal.

* Le régime de sédimentation lagunaire, particulièrement importante sous ce type de climat, est favorisé par :

- des apports terrigènes très importants.
- une dynamique relativement calme, surtout en période de remplissage et en période d'étiage (fermeture du cordon littoral).

- des formations d'algues ou présence de mangrove en zone sous influence marine (piégeage).
- un régime de floculation quasi permanent et favorisé par le calme du milieu, le développement de forts gradients de salinité et la présence de matière organique particulaire en provenance souvent des zones d'inondation.

Le piégeage des pélites semble maximum, sous l'effet de l'interaction permanente de facteurs dynamiques tels que les crues ou le vent et de la salinité, quelle que soit la saison et d'autre part la sédimentation dans les milieux margino-littoraux est à dominance vaseuse et de type kaolinite prépondérant, dans ces régions soumises à un fort drainage continental.

En cas d'ouverture sur la mer, l'apport sédimentaire marin à dominance sableuse peut être important et les conditions de sédimentation favorisée par les mouvements de marée, mais limitées à la région aval de la lagune, située à proximité de l'exutoire.
(LAFOND, 1967 ; WEBB, 1958 et ADEGOKE et al., 1978 au Nigéria ; NICHOLS et al., 1981 au Mexique).

5.2 Le Lac Togo : une problématique représentative ?

Le Lac Togo (6,1° N ; 1,2° E) représente un petit plan d'eau lagunaire de 46 km^2 à l'étiage, situé le long de la côte sableuse du Golfe de Guinée, séparé de la mer par un cordon sableux étroit soumis très irrégulièrement à des ouvertures temporaires et placé sous un régime climatique de type équatorial de transition (dédoublement de la saison humide) à variante sèche (Pm = 900 mm/an). L'approche des caractéristiques du fonctionnement d'un tel milieu, peut être envisagée à travers une double problématique :

- la dynamique particulière liée aux lagunes tropicales de petite dimension et à cordon littoral sableux.
- la réalité hydroclimatologique et océanographique du Golfe de Guinée.

* L'exemple de quelques lagunes mexicaines :

LANKFORD (1976), YANEZ-ARANCIBIA (1981), MANDELLI (1981) étudient un type de petites lagunes tropicales, couramment observées le long de la côte pacifique mexicaine et qui sont soumises à d'importants bouleversements au cours de leur cycle hydrologique annuel, en fonction de l'alternance saisonnière de l'ouverture et de la fermeture de leurs passes sur la mer. Les phénomènes ayant lieu au sein de ces milieux dépendent essentiellement de facteurs morphologiques et dynamiques :

- taille et bathymétrie de la lagune,
- alimentation en eau continentale,
- dynamique côtière et dérives littorales
- régimes des crues et des vents qui apparaissent comme les deux facteurs principaux contrôlant la circulation des eaux dans ces milieux fermés.

Seules les lagunes d'une certaine taille et bien alimentées en apports continentaux présentent un cycle d'ouverture et de fermeture complet chaque année, ce qui n'est pas toujours le cas des milieux de très petite taille.

LANKFORD (1976) et MANDELLI (1981) observent sur la lagune de Nuxco (6,5 km^2), séparée de la mer par un court chenal de quelques centaines de mètres terminé par une barrière sableuse, des variations très brutales du niveau des eaux sous l'effet des apports continentaux, pouvant atteindre 1,2 mètres en 2 jours et provoquant la rupture saisonnière du cordon littoral sous l'effet de la charge hydrostatique. La durée de l'ouverture dépend ensuite de l'ampleur de la vidange lagunaire et de l'action des courants côtiers qui ensablent progressivement le chenal.

MEE (1977) ; YANEZ-ARANCIBIA (1981) et MANDELLI (1981) présentent le cas de la lagune de Chautengo (36 km^2) séparée de la mer par un cordon littoral sableux, de faible profondeur (1 m à l'étiage) et soumise également à un régime climatique de type équatorial de transition à tendance sèche, caractérisé par deux saisons humides centrées sur les mois de juin et septembreoctobre, séparées par une petite saison sèche en août (précipitations annuelles inférieures à 2000 mm). Le cycle hydrodynamique annuel de la lagune de Chautengo est marqué par la succession saisonnière de quatre phases :

- une phase d'isolement au cours de la saison sèche de novembre à mai, marquée par l'augmentation des températures et de la salinité moyenne des eaux (28°C à 40°C ; 25 °/oo à 45 °/oo), sous l'effet de l'ensoleillement et de l'évaporation, avec une production organique primaire de 0,6 g C/cm²/jour.
- une phase de remplissage au cours de la première saison humide de mai à août, marquée par des températures plus basses (29 à 35°C) et une gamme de salinité très faible (0 à 15 °/oo). Le marnage maximum annuel est de l'ordre du mètre. La production organique primaire augmente jusqu'à 1,4 g C/cm²/jour.
- une phase de vidange rapide des eaux continentales de crue, marquée par une baisse de la production organique jusqu'à 0,32 g C/cm²/jour.
- une phase plus longue d'échange avec la mer jusquà la fermeture du cordon littoral sous l'effet des vagues et des courants côtiers. Cette période qui influence l'ensemble du plan d'eau lagunaire est marquée par une stabilisation des températures des eaux à 29-31°C, une remontée de la salinité de 15 °/oo à 34 °/oo, et une augmentation de la biomasse du milieu sous l'effet d'importants apports marins, ce qui conditionne les activités de pêche en lagune.

La lagune de Chautengo offre un bon exemple d'une petite lagune tropicale semi-fermée, soumise à un régime mixte d'ouverture et de fermeture sur la mer sous l'effet d'une alternance saisonnière typique entre les influences marines et continentales au sein du milieu. D'autre part, le régime de mélange des eaux d'origine diverse et de circulation dans la lagune est décrit par MEE (1977), comme un phénomène de circulation de type estuarien, fortement conditionné par l'action du vent, dominante à l'étiage.

Ce régime hydrodynamique annuel, proprement "lagunaire", fortement contrasté, s'accompagne d'une zonation et d'une hétérogénéité spatio-temporelle très accentuées, qui conditionnent la dynamique des populations d'organismes lagunaires, leurs successions dans le temps et leurs migrations au sein et hors du milieu.

La dynamique de la lagune de Chautengo fortement influencée par des facteurs d'ordre climatique présente en outre la très grande variabilité interannuelle qui caractérise d'une façon générale ce type de milieu restreint en régime tropical. (volumes écoulés dans la lagune de Chautengo par son tributaire principal : 1192 millions de m^3 en 1969 ; 252 millions de m^3 en 1972 : in MANDELLI, 1981).

* L'exemple des grands écosystèmes lagunaires du Golfe de Guinée

La côte sableuse du Golfe de Guinée présente, entre la Côte d'Ivoire et le delta du Niger, une succesion d'un grand nombre de milieux saumâtres, estuarien, lagunaire ou mixte, décrits par de nombreux auteurs et dominé par deux ensembles lagunaires principaux : le système lagunaire ivoirien à l'ouest, et le système lagunaire du Bénin et du Nigéria à l'est.

L'ensemble de ces milieux peut être caractérisé d'une façon globale par :

- des apports continentaux très importants, par l'intermédiaire de tributaires à bassin versant de taille très variable, mais subissant bien souvent la double influence du régime climatique de type tropical de transition à une saison humide s'étendant d'août à octobre (régime "soudanien") et du régime de type équatorial de transition à deux saisons humides centrées sur juin et septembre-octobre (régime "guinéen").
- une dynamique littorale active, dominée par l'influence permanente des vagues (orientées couramment à 45° par rapport à la côte) et du courant de Guinée dirigé d'ouest en est, ainsi que l'influence saisonnière des upwelling côtiers.
- une morphologie généralement très allongée, parallèlement au trait de côte, étroite et ramifiée, avec un très petit nombre de passes qui ne sont pas toujours ouvertes en permanence sur la mer.
- une très grande variabilité spatiale, saisonnière et interannuelle des cycles physico-chimiques et hydrodynamiques en lagune, aussi bien en système ouvert ou semi-fermé.

(WEBB, 1958 ; GUILCHER, 1959 ; NICHOLS et al., 1981).

DURAND et CHANTRAINE (1982) présentent une synthèse des différentes caractéristiques de l'environnement physique des lagunes ivoiriennes, 1200 km^2 en système ouvert permanent et insistent sur les points suivants :

- importance de la "saison continentale" marquée au niveau des apports écoulés dans les tributaires, par les influences des régimes "soudaniens" et "guinéens" et conditionnent tout le fonctionnement hydrodynamique lagunaire. "Les apports moyens annuels d'eau douce représentent 4 fois le volume de la lagune Ebrié".
- importance des variations interannuelles du régime des apports continentaux : en lagune Ebrié, les apports précipités et écoulés sont estimés à 10,3 milliards de m^3 en année moyenne ; ils ont été estimés à 4,2 milliards de m^3 en 1958 et à 21 milliards de m^3 en 1963.

Une telles contrainte continentale confère aux écosystèmes lagunaires ivoiriens les deux propriétés principales suivantes :

- les saisons lagunaires présentant trois phases successives

  . une saison sèche (de janvier à avril), marquée par une dominance de l'évaporation et de l'influence marine, accompagnée de forts gradients de salinité.
  . une saison des pluies (de mai à août) accompagnée d'un upwelling côtier et marqué par une baisse importante de la température des eaux.
  . une saison des crues (de septembre à décembre), marquée par une baisse générale de la salinité des eaux.

- Une hétérogénéité spatiale importante, partageant les écosystèmes lagunaires en fonction de la dominance des influences continentales ou marines selon les régions.

L'appréciation des caractéristiques de tels environnements si instables doit être envisagée par l'intermédiaire de la mesure directe in situ d'un grand nombre de paramètres hydroclimatologiques, physico-chimiques et hydrobiologiques adaptés.

Enfin, TEXIER et al. (1979) sur le Lac Nokoué au Bénin insistent sur deux points principaux :

- l'importance du régime d'ouverture et de fermeture du système sur la mer (chenal de Cotonou), conditionnant l'hydrodynamique et la physicochimie lagunaire.
- le caractère fortement oligomictique de ces milieux, même assez étendus (160 km^2 pour le Lac Nokoué), dès qu'ils sont très peu profonds (de l'ordre d'un mètre à l'étiage) et soumis à l'action dynamique quotidienne des vents marins (brise de mer diurne) ; on constate l'absence sur l'ensemble du plan d'eau de toute stratification thermo-haline, à l'exception de la région "estuarienne" située à proximité immédiate de l'exutoire en période d'ouverture sur la mer.

En définitive, toute étude des caractéristiques du fonctionnement des milieux margino-littoraux en régime tropical peut être développée selon trois orientations complémentaires :

- une étude de l'environnement sédimentologique lagunaire permettant :

  . d'évaluer l'histoire géologique de la formation de la lagune,
  . de connaître les grands traits de sa dynamique hydrologique actuelle,
  . d'estimer l'évolution ultérieure du milieu.

- une étude des paramètres de l'environnement physique lagunaire, (hydroclimatologique et physico-chimique), conduisant au calcul des bilans hydrique et salin de la lagune, et permettant le cas échéant d'éventuelles modélisations.
- une étude de l'impact écologique en lagune provoqué par le régime de ses ouvertures sur la mer, permettant de contrôler, le cas échéant, un type d'échange optimal d'un point de vue biologique entre le milieu lagunaire et la mer et d'adapter le mode d'exploitation des ressources lagunaires en conséquence.

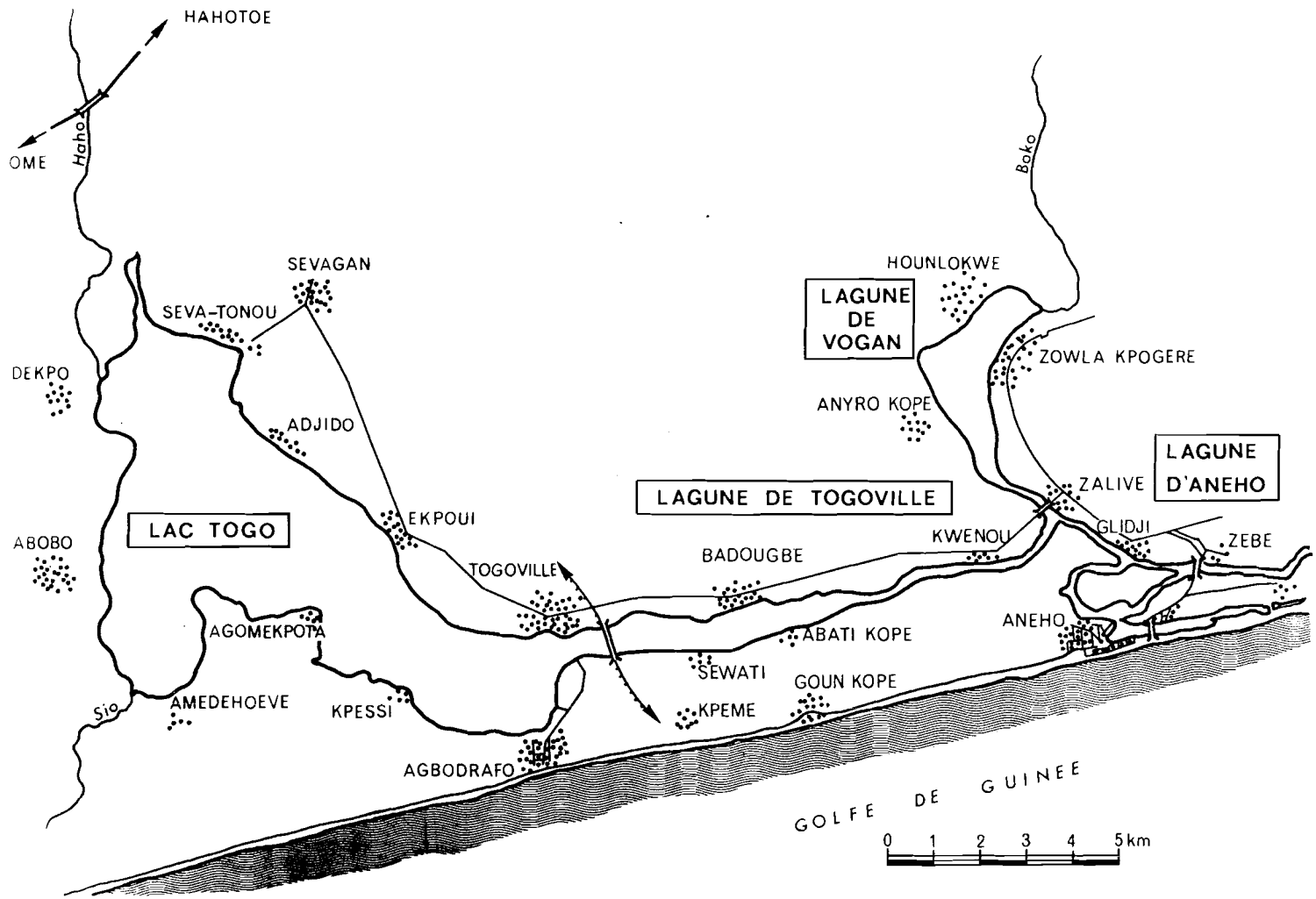


Fig-4 SYSTEME LAGUNAIRE DU TOGO CARTE DE SITUATION GENERALE

CHAPITRE II

ENVIRONNEMENT DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS :

DEFINITION DE L'ETUDE.

1 - LE MILIEU NATUREL (cf. carte de situation générale, Fig. 4)

Le système lagunaire togolais (6°,10'N; 1°,30' E), se présente ainsi qu'un grand nombre de milieux similaires qui se succèdent le long de la côte sableuse du Golfe de Guinée, entre la Côte d'Ivoire, et le delta du Niger, comme une petite retenue littorale poïkilohaline, située dans une dépression fluviale inondée vraisemblablement lors de la dernière transgression marine holocène (Nouakchottien au Sénégal, Flandrien en Europe), il y a 5000 ans environ (cf. I, 2). Le système se trouve actuellement séparé de la mer par un cordon littoral sableux, perpétuellement entretenu par la dynamique des vagues (orientation à 45° par rapport au trait de côte) et de la dérive littorale qui longe la côte d'ouest en est (appartenant au courant de Guinée). Le cordon littoral n'est ouvert artificiellement au niveau de la ville d'Aneho, que pour pallier la menace d'inondation de villages riverains, en cas de crue exceptionnelle et se referme naturellement quelques semaines aprés la vidange de crue. La dernière ouverture de l'exutoire du système sur la mer à Aneho, a eu lieu de la mi-septembre à la mi-décembre 1980.

L'ensemble constitué par le plan d'eau du Lac Togo et des chenaux ramifiés qui le prolongent vers l'est jusqu'à la ville d'Aneho, représente un milieu margino-littoral semi-fermé, en communication occasionnelle et temporaire avec la mer et coïncide avec la définition d'une "lagune fermée" proposée par NICHOLS et al. (1981), ou d'une lagune côtière à barrière littorale sableuse de type III-A, proposée par LANKFORD (1976).

Selon ces auteurs, on peut s'attendre à ce que la dynamique saisonnière du fonctionnement de ce "complexe lagunaire" au Togo, soit totalement tributaire des conditions hydroclimatiques locales, contrôlant le régime des crues (échanges continent-océan) et le régime des vents (circulation et mélange des eaux ; sédimentation). Une communication permanente quoique limitée, du

système lagunaire togolais avec le système lagunaire ouvert sur la mer, de Grand Popo, au Bénin, par l'intermédiaire de l'étroit chenal du Gbaga, ajoutera cependant une composante supplémentaire à la dynamique régionale de ces lagunes.

Le "Lac Togo" proprement dit constitue un plan d'eau assez étroit, orienté NW, SE, de 13 km de long, dans sa plus grande diagonale NW, SE et de 6 km dans sa plus petite diagonale NE, SW, qui s'étend depuis les villages de Sevatonou et de Dekpo, dans le nord, jusqu'à ceux d'Agbodrafo et de Togoville situés au sud. Les contours de cet ensemble ont été relevés d'après la carte IGN au 1/50 000è de 1960, les observations des clichés aériens de la couverture de 1978 n'ayant pas révélé de modification notoire. La surface du Lac proprement dit, est estimée à 46,2 ± 0,5 km^2, à l'étiage.

Le Lac est prolongé vers le sud-est, à partir de Togoville par une lagune de 13 km de long, de largeur maximale 900 m, et minimale 150 m, qui rejoint au pont de Zalivé, d'une part le réseau de bras plus étroits de la lagune d'Aneho s'étendant jusqu'à la mer, et d'autre part l'exutoire du plan d'eau de la lagune de Vogan constituée d'une bande de 7 km de long et de 1,5 km de large, orientée Nord-Sud.

Le Lac Togo et l'ensemble de son sytème lagunaire représente au total une superficie de 63,8 ± 0,2 km^2.

Ce système lagunaire est alimenté principalement par trois rivières : le Sio et le Haho qui débouchent respectivement à l'ouest et au nord du Lac Togo et le Boko de moindre importance qui se jette au nord de la lagune de Vogan. Cet ensemble de tributaire draine un bassin hydrographique de 7 200 km^2 (Bassin du Haho : 3400 km^2; Bassin du Sio : 2800 km^2; Bassin du Boko : 1000 km^2)

Il faudrait à cela, ajouter le fleuve Mono, avec lequel la lagune d'Aneho communique en permanence par l'intermédiaire d'un chenal étroit, le Gbaga, s'éloignant vers l'est parallèlement à la côte et rejoignant le bas Mono à Agbanakin.

En outre, l'ouverture artificielle et temporaire du cordon lagunaire sur la mer, au niveau d'Aneho, vient modifier périodiquement (tous les 2 ou 3 ans) le régime hydrologique de cet ensemble lagunaire, soumis à de nombreuses influences diverses.

2 - LES OBJECTIFS DE L'ETUDE

Avant de pouvoir mettre en évidence l'ensemble des mécanismes du fonctionnement de l'écosystème lagunaire du Lac Togo, toute étude préliminaire doit tout d'abord s'orienter vers un approfondissement des connaissances relatives à l'environnement physique du milieu, que l'on abordera à travers l'étude d'un certain nombre de paramètres sensibles, qui seront de deux types : hydroclimatologique et hydrochimique.

2.1 Les études hydroclimatologiques

Ces études chercheront à définir et à quantifier les volumes d'eau qui sont mis en présence au cours d'une année hydrologique dans les lagunes et qui conditionnent les écoulements et les échanges de masses d'eau de qualité différente.

Des études limnigraphiques sur les bras lagunaires tenteront, en outre de suivre l'évolution et le sens de ces écoulements, et de mettre en évidence l'existence éventuelle d'une influence des marées.

2.2 Les études hydrochimiques

Ces études chercheront à suivre l'évolution saisonnière de la qualité et tout particulièrement de la salinité des eaux lagunaires, sur l'ensemble des chenaux et du plan d'eau du Lac Togo. La grande variabilité hydrochimique présumée de ce milieu résulte du mélange in situ d'un apport continental non négligeable et d'une intrusion marine, en ce début d'étiage 1981 à la suite de l'ouverture du système sur la mer à la fin de l'année 1980. De plus, la connaissance de l'évolution spatio-temporelle de la salinité des eaux devrait permettre de mettre en évidence quelques caractéristiques locales de la dynamique des eaux de la lagune.

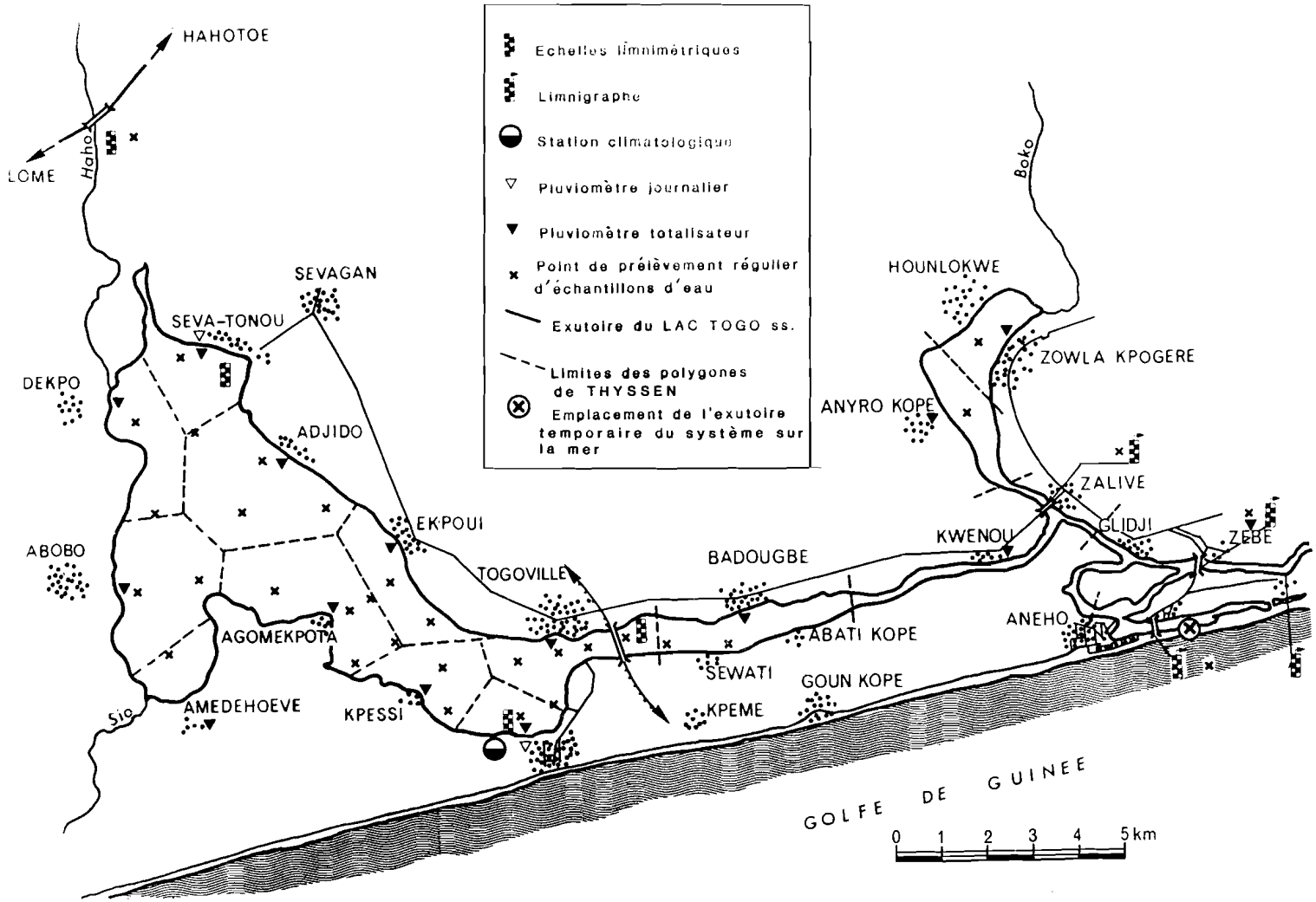


Fig-5 Etude du système lagunaire du TOGO Carte des installations hydroclimatologiques

3 - L'ORGANISATION DE L'ETUDE-METHODOLOGIE (cf. carte des installations, Fig. 5)

3.1 L'étude hydroclimatologique

3.1.1 Les installations limnimétriques et limnigraphiques

Nous avons procédé à l'installation d'une batterie d'échelles limnimétriques à trois lectures quotidiennes sur le Haho, à Hahotoe, à 6 km de son embouchure sur le Lac et qui vient compléter les observations des stations hydrométriques situées plus en amont.

Une seconde batterie d'échelles limnimétriques a été placée sur le Lac Togo à Agbodrafo, venant s'ajouter aux deux autres batteries de Sevatonou et de Kpémé déjà existantes sur le Lac et qui permettent, à raison de trois lectures quotidiennes, une bonne appréciation des variations journalières et saisonnières du plan d'eau du Lac.

Le site de la lagune d'Aneho nous a semblé propice à l'installation de quatre limnigraphes OTT X hebdomadaires, sur les ponts de Zalivé, de Zébé, d'Aneho et sur la rive Sud du Gbaga au niveau de Sanvie Kondji. Ces appareils devant permettre l'estimation des pentes de ligne d'eau dans les bras lagunaires, ainsi que la mise en évidence des effets de marée éventuels, à proximité des exutoires du système : temporaire au niveau du cordon littoral d'Aneho ; permanent au niveau du débouché du Gbaga.

Le tableau suivant regroupe les cotes du zéro des principales échelles limnimétriques, raccordées au Nivellement Général du Togo (IGN) :

Station	Cote de zéro (m)
Sevatonou	-0.02
Kpémé	-0.143
Aneho	+0.543
Sanvie Kondji	+0.399
Zalivé	+0.384
Zébé	-6.872 (échelle du limnigraphe)

3.1.2 Les installations climatologiques

3.1.2.1 La station climatologique d'Agbodrafo

Dans le but d'estimer les lames d'eau évaporées sur le Lac Togo, nous avons placé une petite station climatologique sur la rive Sud du Lac, dans l'enceinte du Centre de Recherches Halieutiques d'Agbodrafo, équipée d'un psychromètre sous abri, d'un héliographe, d'un bac évaporatoire enterré de 1 m^2 (version ORSTOM du bac Colorado), d'un pluviomètre au sol, d'un pluviomètre à 1,50 m et d'un pluviomètre totalisateur.

D'autre part, la température des eaux à la surface du Lac a été relevée devant la station en même temps que les relevés des températures de l'air sous abri.

3.1.2.2 Les pluviomètres totalisateurs

Dans le but d'estimer la masse d'eau précipitée sur le Lac Togo, nous avons, dans un premier temps utilisé les relevés effectués aux pluviomètres de la station d'Agbodrafo au sud du Lac, et d'un pluviomètre placé dans le nord du Lac à Sevatonou.

Dans un second temps, afin d'étendre les mesures sur l'ensemble du système lagunaire et d'en augmenter la précision, nous avons disposé tout autour des rives du Lac Togo et des lagunes, un réseau de 15 pluviomètres totalisateurs qui ont été relevés à partir du mois de mars 1982.

3.1.3 Le sondage de quelques puits littoraux

Afin de surveiller l'évolution chimique et piézométrique de la nappe des sables côtiers à proximité de l'exutoire de la lagune sur la mer, nous avons procédé à quelques prélèvements et sondages sur quelques puits littoraux de la ville d'Aneho.

3.2 L'étude hydrochimique

3.2.1 L'échantillonnage

3.2.1.1 Le réseau de points de prélèvement (cf. Fig. 5 et Fig. 6)

Afin d'obtenir une bonne représentativité de l'échantillonnage, nous avons envisagé un réseau très dispersé de 31 points de prélèvements, en tenant compte de considérations géographiques, morphologiques et des résultats des premières campagnes de prospection conductimétriques. Les emplacements de ces points sont reportés sur la Fig. 5.

Par la suite et, en tenant compte d'une polarité nord-sud observée quant à la salinité des eaux, nous avons regroupé ces points en 8 zones de caractéristiques homogènes, sur lesquelles s'appuieront les études hydrochimiques ultérieures. Le découpage de ces zones est reporté sur la Fig. 6.

La zone 1A représente l'extrémité nord du Lac Togo, face à l'embouchure du Haho.

La zone 1B représente l'extrémité sud-ouest du Lac Togo, face à l'embouchure du Sio.

Ces deux zones seront souvent regroupées pour des raisons de similitude, en une seule (zone 1).

La zone 2 représente le nord et le nord-ouest du Lac Togo.

La zone 3 représente la région centrale du Lac Togo.

La zone 4 représente la région intermédiaire et morphologiquement plus étroite, située entre les cuvettes nord et sud du Lac Togo.

La zone 5 recouvre tout le sud du Lac Togo.

La zone 6 représente la partie du bras lagunaire s'étendant vers l'est depuis Togoville jusqu'au village de Kwenou.

La zone 7 recouvre l'ensemble des bras lagunaires qui constituent la lagune d'Aneho.

La zone 8 représente la petite lagune de Vogan.

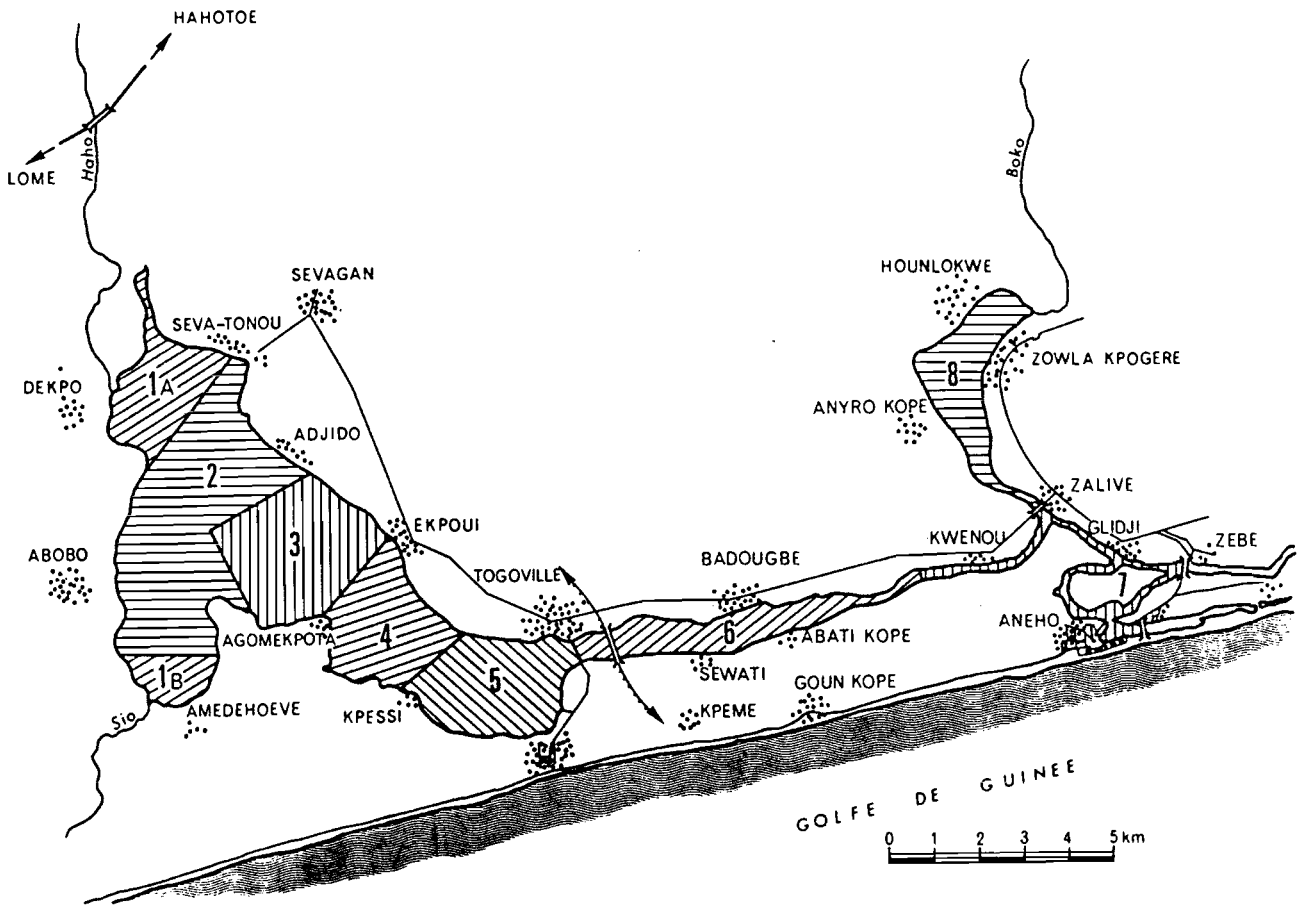


Fig-6 Etude du système lagunaire du TOGO Plan de découpage de l'ensemble du plan lagunaire en 8 zones

3.2.1.2 La fréquence des prélèvements

D'une façon générale les prélèvements ont été effectués simultanément sur l'ensemble du Lac et des lagunes avec une périodicité mensuelle mais à l'étiage, période de fort gradient salin, deux prospections mensuelles ont été nécessaires tandis qu'au contraire en période de crue, une prospection tous les mois et demi s'est avérée suffisante.

3.2.1.3 Méthodologie de l'échantillonnage

Les prélèvements ont été effectués toujours de la même façon à l'aide d'un dispositif lesté simple, à ouverture commandée depuis la surface.

Deux prélèvements à chaque verticale ont été nécessaires en période d'étiage, à 0,20 m de la surface et à 0,20 m du fond, après que quelques essais aient montré l'inutilité d'un prélèvement à mi-profondeur. En période de crue quand les eaux deviennent très homogènes, un seul prélèvement par verticale, issu d'un mélange à égal volume des eaux de surface et de profondeur s'est avéré trés représentatif.

3.2.1.4 La représentativité de l'échantillonnage

Quelques essais d'échantillonnage simultanés et très rapprochés dans l'espace, ont été effectués et ont permis d'évaluer la représentativité d'un échantillonnage ponctuel par verticale.

A. le 25-03-81 - Conductivité 17 500 µS - Profondeur de la station : 1.15 m

a - Deux prélèvements immédiatement successifs sur la même verticale A, dans le sud du Lac.

Lieu du prélèvement	Variation de la conductivité entre les deux prélèvements (%)
surface	3,5
mi-profondeur	4
profondeur	0,5

b - Trois prélèvements successifs à 200 mètres de distance de la verticale précédente A.

	Variation de la conductivité par rapport à la verticale précédente (%)		
N° de la verticale	1	2	3
surface	4,1	4,3	2
mi-profondeur	3,5	5,2	3,2
profondeur	0,3	0,2	0,6

On remarquera le maximum de variation de la conductivité à mi-profondeur, et le minimum en profondeur, zone plus stable.

B. le 15-04-81 - Conductivité 9 500 µS - Profondeur de la station : 1,20 m.

Trois prélèvements successifs à distance variable d'une verticale B, habituellement relevée dans le nord du Lac.

Distance par rapport à la verticale A (m)		Variation de conductivité (%) par rapport à la verticale B
surface	200	4,2
surface	300	5
profondeur	300	3
surface	500	9,5

On en déduit qu'en deçà d'une distance de 300 mètres, la variabilité de l'échantillonnage reste inférieure à la précision même des analyses en ce qui concerne les mesures de conductivité dans la gamme de valeur rencontrée (5 à 6 %).

La distance moyenne séparant deux points de prélèvement du réseau étant voisin de 1000 mètres, la distance qui n'est pas prospectée entre deux points reste inférieure à 500 mètres et facilement contrôlable par la méthode des gradients linéaires sur de courtes distances.

3.2.2 Les paramètres étudiés

3.2.2.1 Les paramètres physico-chimiques

a - la température : Paramètre essentiel dans l'appréciation de la qualité des eaux et de ses potentialités hydrobiologiques, la température a tout d'abord été mesurée systématiquement à chaque prélèvement à l'aide d'un thermomètre à mercure au 1/10° de degré. Dès l'étiage 1982, une excellente corrélation (au 1/10° de degré) constatée entre la température moyenne en surface sur l'ensemble du Lac et les trois mesures quotidiennes effectuées régulièrement en surface à Agbodrafo sur la rive sud du Lac depuis le mois d'août 1981, nous a dispensé de la prospection systématique des températures de surface sur l'ensemble du Lac.

b - la transparence : déterminée à l'aide d'un disque de SECCHI de 30 cm de diamètre, la transparence à fait l'objet d'un contrôle systématique à partir du 03-06-81. Deux exemples des variations spatiales et journalières de la transparence ont été observés en trois stations choisies dans le sud du Lac.

c - le pH : a été déterminé à l'aide d'un pH-mètre électronique POLYMETRON de laboratoire à électrode combinée verre-calomel, de précision 0,05 unité, et de grande fidélité à l'étalonnage. Les mesures ont été effectuées le soir de chaque campagne de prélèvement.

d - la conductivité : est le paramètre essentiel qui a été utilisé quant à l'investigation globale de la charge saline des eaux, ainsi que son évolution spatiale et saisonnière. Les mesures ont été effectuées au laboratoire, toujours dans des conditions identiques, à l'aide d'un pont de KOLRAUSH PHILIPS PR 9500 et d'une cellule de platine, le soir même de chaque campagne de prélèvement. La précision minimale atteint 6 % pour les plus hautes gammes de valeurs rencontrées sur le Lac lors de l'étiage 1981.

e - l'oxygène dissous : ne disposant d'aucun oxymètre à électrode, nous avons utilisé sur le terrain la méthode traditionnelle de WINKLER, pour surveiller les variations journalières de la teneur en oxygène dissous en deux stations choisies pour leur exposition différente, le 10-07-81. En pratique, la précision espérée est de 0,2 g/l d'oxygène.

f - les matières en suspension : déterminées par la méthode classique de la pesée aprés séchage à 105°C d'un filtre millipore de 0,45 µ, la MES a permis de suivre depuis le 03-06-81 l'importance régionale du brassage mécanique des eaux, la progression de la salinité à l'étiage et la progression des eaux continentales de crue.

3.2.2.2 Les paramètres chimiques

a - l'ion sodium et l'ion potassium : ont été régulièrement dosés au photomètre de flamme avec une précision de 1 à 2 %.

b - l'ion calcium et l'ion magnésium : n'ont été dosés au spectrophotomètre d'absorption atomique avec une précision voisine de 1 % qu'à partir de l'installation de l'appareil au cours de l'étiage 1982. Seules les mesures obtenues à partir du mois de février 1982 seront donc présentées.

c - l'ion chlorure : n'a été dosé avec une précision suffisante par potentiomètrie, qu'à partir de l'étiage 1982. Seules les mesures obtenues à partir du mois de février 1982 seront donc présentées.

d - l'alcalinité : le titre alcalimétrique complet (TAC) a été régulièrement dosé par le titrage à l'acide sulfurique N/50, contrôlé au pH-mètre jusqu'à la valeur pH = 4,4.

CHAPITRE III

ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS.

1 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES GEOLOGIQUES DU MILIEU

1.1 Environnement géologique

Le Lac Togo se situe dans une dépression littorale du bassin sédimentaire côtier du Togo. La rive sud du système lagunaire est constituée des formations détritiques du cordon littoral sableux, tandis que les rives nord, est et ouest, sont constituées à l'affleurement des formations ferrallitiques du plateau des "Terres de Barre" qui dominent le plan d'eau d'une vingtaine de mètres.

Mis à part le ruissellement direct des rives, le Lac Togo proprement dit, est alimenté par ses deux tributaires, le Haho et le Sio, dont les bassins respectifs drainent sur 85 % de leur superficie des sols issues de l'altération du socle cristallin, où dominent gneiss et migmatites accompagnées vers le nord-ouest de quartzites, d'amphibolites et de marbres dolomitiques ainsi que de nombreux micaschistes (LENOIR F. com. pers.). Dans la partie aval de leurs cours, le Sio et le Haho rencontrent les formations sablo-argileuses du Continental Terminal qui surmontent des argiles et des marnes tertiaires.

On notera la présence d'horizons phosphatés à 6 km en amont de l'embouchure du Haho sur le Lac, à proximité immédiate de la station de contrôle de Hahotoe.

D'autre part, le cours inférieur du Sio, traverse dans ses derniers kilomètres une plaine d'inondation tourbeuse, riche en matière organique.

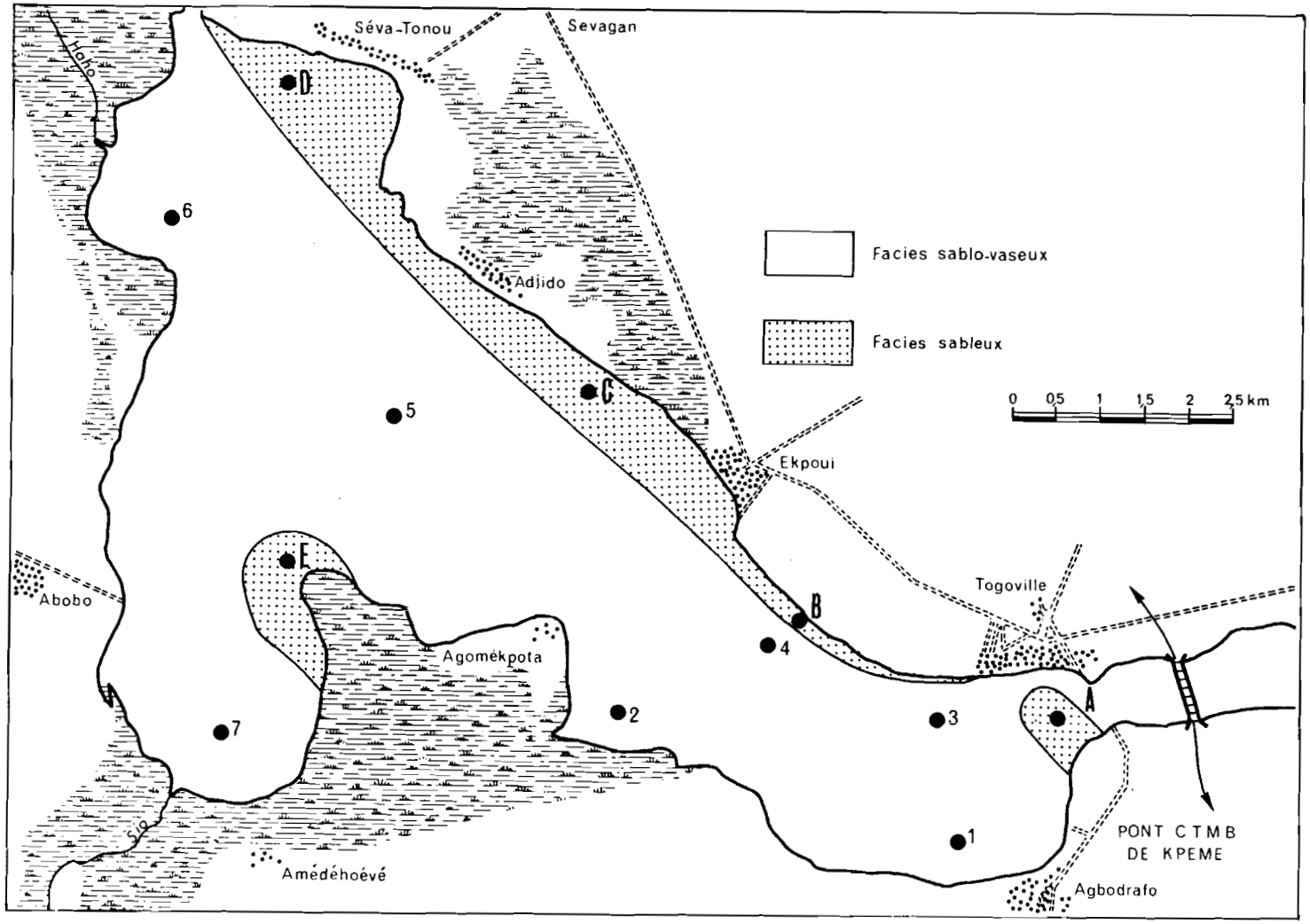


Fig-7 Carte sédimentologique des fonds du LAC TOGO

1.2 Sédimentologie des fonds lagunaires (cf. carte sédimentologique, Fig. 7)

1.2.1 Les bancs de sable

Une longue bande sableuse a été observée tout le long de la rive nord-est du Lac Togo, ainsi que deux bancs de sable plus petits, à l'entrée de la baie de l'embouchure du Sio et au sud du Lac, devant Togoville.

Par ailleurs, les fonds du Lac Togo présentent et, sur une assez grande profondeur, une vase très fine et riche en matière organique et débrits coquilliers.

Les fonds des bras lagunaires sont également très vaseux avec quelques bancs de sable le long de la rive nord de la lagune de Togoville. En outre, une formation de beach-rock a été observée dans la lagune d'Aneho, à proximité immédiate du cordon littoral.

Le tableau 2 présente les caractéristiques granulométriques de quelques échantillons de sédiments du Lac Togo proprement dit et dont la situation est reportée sur la Fig. 7.

Il ressort des résultats granulométriques une nette distinction entre la zone des sédiments vaseux (éch. 1 à 7), riches en argile et limon et recouvrant la majeure partie des fonds du Lac et les bandes sableuses (éch. A à E) marginales.

En ce qui concerne les fonds vaseux, on notera la dominance des argiles et limons fins dans les zones abritées du Lac (éch. 1 et 2), ainsi que devant l'embouchure du Sio (éch. 7), où les limons grossiers sont également abondants et l'enrichissement en éléments grossiers dans la région nord du Lac où les sables dominent (éch. 5 et 6).

En ce qui concerne les bandes sableuses, on remarquera un léger enrichissement en limon dans la région centrale du Lac (éch. B et C). Les sables grossiers dominent dans le nord du Lac (éch. D), tandis que les sables fins dominent dans le sud (éch. A).

STATIONS	1	2	3	4	5	6	7	A	B	C	D	E
MATIERES ORGANIQUES	2,7	2,7	1,65	2,25	1,6	2,5	3,9	-	-	-	-	-
$CaCO_3$	0,9	12,9	18	21,1	8	1,3	8	-	-	-	-	-
GRANULOMETRIE												
ARGILE 0-2 µ	37,5	46,7	29,4	38,2	27,5	44,3	43,4	3	12,9	5,85	1,4	2,94
LIMON FIN 2-20 µ	36,6	31,4	10,9	14,3	13,9	15,5	25,2	0,6	4,5	2,58	0,47	0,7
LIMON GROSSIER 20-50 µ	1,65	2,2	2,9	6,5	6,8	6,15	12,9	0,3	3,6	2,0	1,05	0,22
SABLE FIN 50-200 µ	5,4	8,4	28,7	17,3	20,2	32,8	7,55	79,4	18,3	17,1	11,6	67,5
SABLE GROSSIER 200-2000 µ	19	12,5	28,3	24,5	34,1	2,4	10,7	18,4	60,6	73,1	85,9	29,3
FACIES	V	V	S.V	S.V	S.V	V	V	S	S	S	S	S

Tableau 2 : Quelques caractéristiques physico-chimiques et granulométriques d'échantillons de sédiment du Lac Togo (plan de situation sur Fig. 7).

- Les résultats sont exprimés en % du poids de sédiment séché à 105°C.
- La matière organique et le $CaCO_3$ sont exclus du calcul du % granulométrique.
- V représente un faciès vaseux ss.
  S.V représente un faciès sablo-vaseux ss.
  S représente un faciès sableux ss.

N.B. : un faciès sableux présente plus de 75 % de particules de taille supérieure à 63 µ.
un faciès vaseux présente moins de 35 % de particules de taille supérieure à 63 µ.

2 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES CLIMATIQUES LOCALES

2.1 Lames d'eau précipitées

Une première estimation des lames mensuelles précipitées sur le Lac Togo, a été faite à partir des relevés des pluviomètres de Sevatonou dans le nord du Lac et d'Agbodrafo dans le sud du Lac, depuis le mois de juillet 1981 jusqu'au mois de mars 1982 et depuis, l'estimation des lames d'eau mensuelles précipitées a été faite sur l'ensemble du système lagunaire à partir des relevés des pluviomètres totalisateurs répartis sur les rives du Lac et des lagunes, en utilisant la méthode des coefficients de pondération de THYSSEN.

La Figure 8 précise le contour des polygones de THYSSEN qui ont été retenus sur le plan d'eau du Lac.

Le tableau 3 présente les valeurs des lames d'eau précipitées mensuellement sur l'ensemble du système lagunaire. Nous distinguerons la région du Lac Togo proprement dit, de celle constituée par les lagunes de Togoville, d'Aneho et de Vogan.

On trouvera en ANNEXE les hauteurs cumulées relevées à chacun des pluviomètres totalisateurs, ainsi que la liste des coefficients de THYSSEN.

DATE	JUIL 1981	AOUT	SEP	OCT	NOV	DEC	JANV 1982	FEV	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT +SEPT	OCT	NOV
LAC TOGO	51	43,2	121	120	21,7	0	11,2	95	53,7	110,6	228,2	448	94,7	23,9	38,6	1,8
LAGUNES	-	-	-	-	-	-	-	-	-	95,7	244,9	408,7	159,2	25,1	45,9	1,7

TABLEAU 3 : Lames mensuelles précipitées (en millimètres) sur le système lagunaire.

Le système lagunaire du Lac Togo est tout entier soumis au régime équatorial de transition à deux saisons pluvieuses annuelles et les tributaires à petits bassins versants côtiers présentent un régime d'écoulement à tendance guinéenne, avec dédoublement de la période de crue. Une première période humide

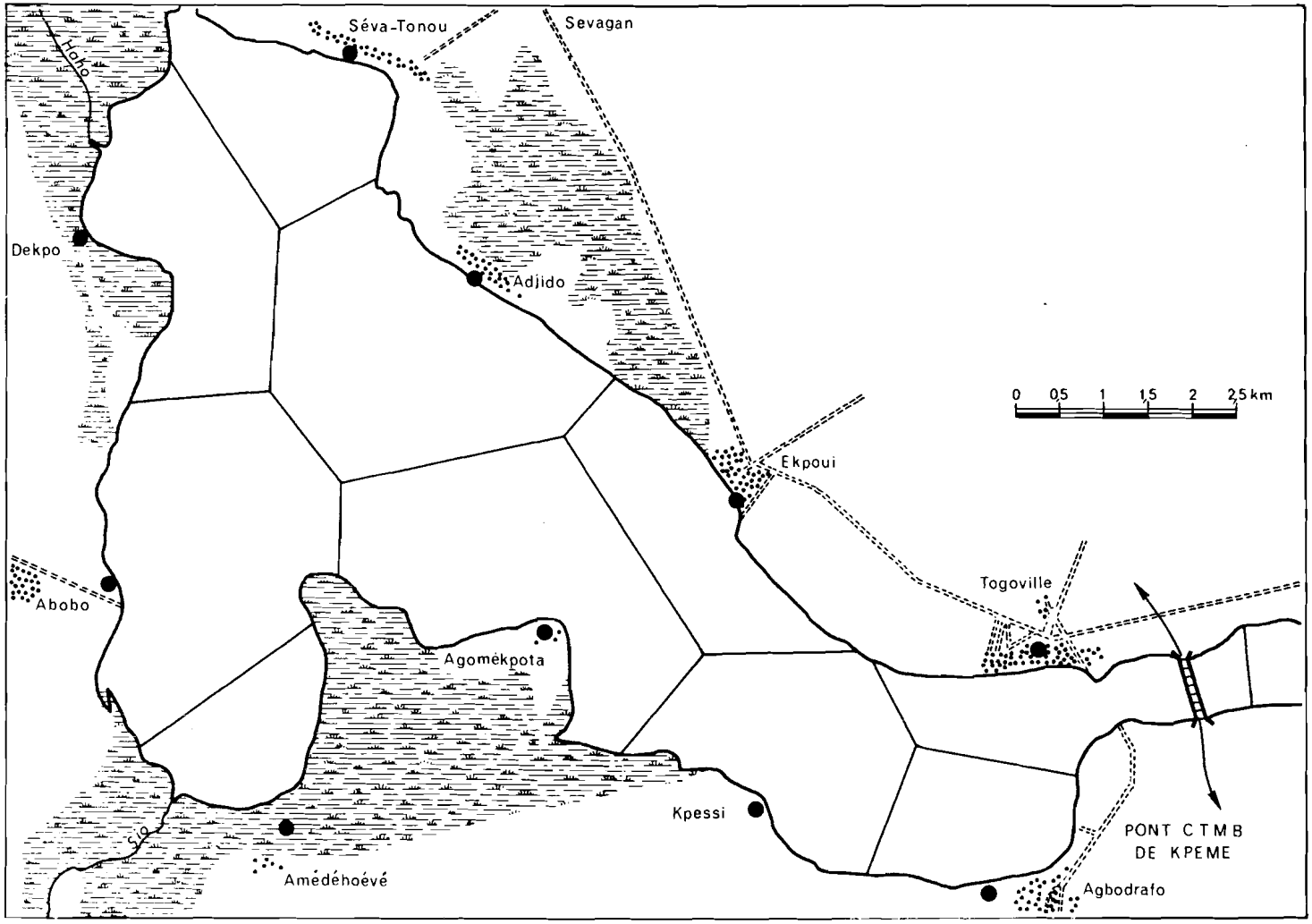


Fig-8 Découpage des polygones de THYSSEN sur le plan d'eau du LAC TOGO

s'étend de mai à juillet avec un maximum des précipitations en juin et une seconde période humide s'étend de septembre à novembre avec un maximum en octobre.

Les isohyètes annuelles sur la zone lagunaire sont de 600 mm en année décennale sèche, de 1150 à 1200 mm en année décennale humide et de 850 mm en année normale homogénéisée sur 49 ans ; la pluviométrie étant toujours un peu plus élevée sur la zone lagunaire qu'à Lomé (isohyète de 800 mm en année normale).

Par contre, les isohyètes annuelles en tête des bassins du Sio et du Haho sont beaucoup plus élevées et estimées à 1300 mm en année normale, 1700 mm en année décennale humide et 1100 mm en année décennale sèche.

La hauteur précipitée sur le plan d'eau du Lac Togo au cours de l'année 1982 est estimée à 1106 mm, ce qui est comparable à la valeur des précipitations moyennes observées sur une période de 10 ans à Togoville (1028 mm), mais largement supérieure à la valeur des précipitations moyennes interannuelles corrigées et homogénéisées sur 49 ans à la même station de Togoville (865 mm). A titre de comparaison, les hauteurs précipitées en moyenne interannuelle corrigée et homogénéisée sur 49 ans, sont de 799 mm à la station de Lomé (ORSTOM) à proximité de la mer et de 935 mm à Aneho. (Atlas Togo PNUD, 1982).

Le régime des précipitations en région côtière au Togo appelle trois remarques :

- une pluviomètrie relativement déficitaire par rapport à celle des pays voisins : précipitations interannuelles de 1300 mm sur le Lac Nokoué au Bénin (43 ans) (in TEXIER et al., 1979) ; précipitations moyennes interannuelles de 2100 mm à Abidjan ces 30 dernières années (in DURAND et CHANTRAINE, 1982). Cette anomalie climatique se traduit d'ailleurs par la présence exceptionnelle d'une savane arborée à baobab sur la rive nord du système lagunaire.
- une très grande variabilité interannuelle comparable à celle qui est observée au niveau de l'ensemble de la zone climatique : total annuel de 2145 mm en 1979 et de 1137 mm en 1980, à la station ORSTOM d'Adiopodoumé ; cette variabilité interannuelle à l'instar du système lagunaire ivoirien, aura d'importante conséquence sur le comportement de "l'hydro-climat lagunaire" (DURAND et CHANTRAINE, 1982).

- une grande variabilité spatiale des régimes pluviomètriques, masquée par une légère augmentation des précipitations le long de la côte d'ouest en est et surtout par la grande disparité entre les régimes pluviométriques amont et aval des deux principaux tributaires du Lac Togo, ce qui permet d'ailleurs de maintenir la permanence d'un léger écoulement dans le Sio.

2.2 Températures moyennes

La Fig. 9 présente l'évolution comparée des valeurs moyennes décadaires des températures de l'air mesurées sous abri à la station climatique d'Agbodrafo, et des températures de l'eau mesurées respectivement à la surface du bac évaporatoire de la station et à la surface du Lac, à proximité de la station ; cette dernière mesure étant très représentative de la valeur moyenne de température de surface du Lac Togo, pris dans son ensemble (à 0,1°C près).

Les diagrammes de température soulignent une légère baisse des valeurs moyennes décadaires dans la seconde partie de l'année 82 par rapport à l'année précédente. D'autre part, il apparaît que les températures de la surface du Lac et du bac évaporatoire évoluent de façon très semblable, ce qui ne nuira pas à la validité de l'estimation de l'évaporation Ep d'une surface d'eau libre par la formule de PENMAN, qui tiendra compte des observations au bac. Enfin, les valeurs de température de la surface du Lac apparaissent toujours inférieures à celles de la surface du bac et supérieures à celles de l'air sous abri. L'impact de l'harmattan se traduit encore nettement par une baisse importante de la température de l'air et de la surface des eaux, au cours du mois de janvier, simultanément avec la baisse des valeurs d'insolation et d'humidité relative. D'autre part, l'arrivée de la saison humide se traduit par une baisse brutale des températures à partir de la deuxième décade d'avril, dès l'arrivée des premières précipitations, phénomène synchrone de la chute brutale des durées d'insolation. A partir du mois de juin jusqu'à la mi-juillet, les températures de la surface des eaux deviennent plus faibles que celles de l'air sous abri, ce qui pourrait être dû, simultanément à la réduction des durées d'insolation et au mélange avec les eaux de précipitation.

Les valeurs extrêmes des températures de l'air mesurées sous abri, ont été de 21,5°C le 26-07-82 à 6 h et 32,5°C le 28-03-82 à 12 h.

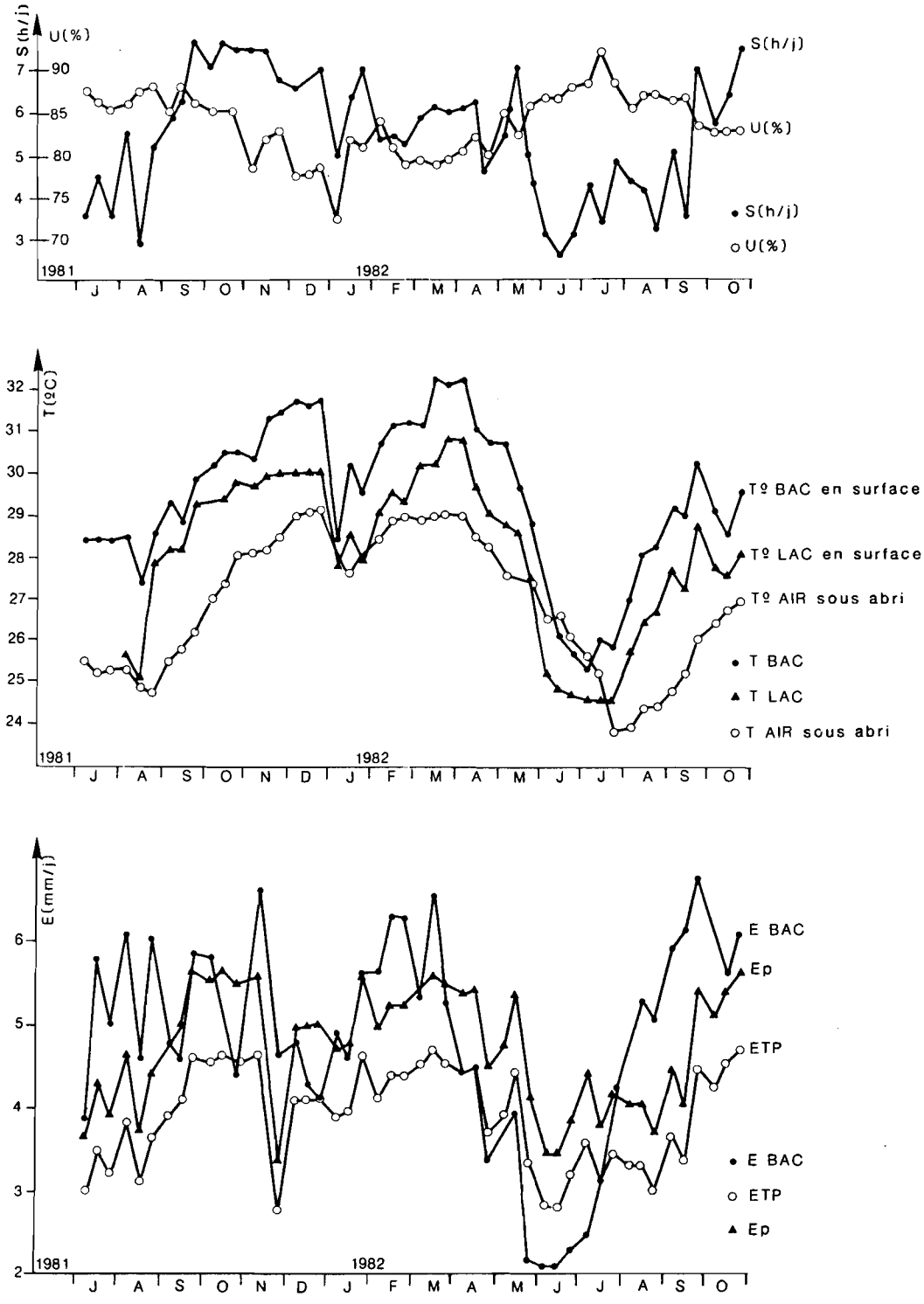


Fig-9 EVOLUTION COMPAREE DE QUELQUES PARAMETRES CLIMATIQUES ET DE L'EVAPORATION A LA STATION D'AGBODRAFO

Les valeurs extrêmes des températures relevées à la surface du bac évaporatoire ont été de 23,5°C à 6h (à 7 reprises entre le 04-06 et le 12-07-82) et de 37°C le 26-03-82 à 12 h.

Les températures de l'air mesurées sous abri en bordure du Lac Togo varient entre 24°C et 29°C en valeur moyenne décadaire au cours de la période d'observation. Ces valeurs n'apparaissent aucunement contradictoires avec les observations effectuées à la station de Lomé - aéroport (26 à 27°C en valeur moyenne interannuelle) (Atlas Togo PNUD, 1982) , à la station de Cotonou au Bénin (valeurs moyennes mensuelles variant entre 24°C et 31,5°C, TEXIER et al., 1979) et les relevés effectués en bordure des lagunes ivoiriennes : amplitude annuelle de 3,3°C entre un maximum à l'étiage au mois de mars (27,7°C) et un minimum à l'issue de la première période de crue au mois d'août (24,4°C), les moyennes mensuelles extrêmes ayant été de 35,2°C en mars 1964 et de 19,2°C en août 1956, (d'après MONTENY et LHOMME, 1980 - période 1950 - 1979).

Les valeurs de l'amplitude thermique annuelle sont très faibles et du même ordre de grandeur que les valeurs de l'amplitude journalière, qui n'est jamais inférieure à 3°C, mesurée sous abri à proximité du Lac Togo, quelle que soit la saison et pouvant être supérieure en saison sèche (Harmattan).

2.3 Hygrométrie moyenne

La formule psychrométrique classique a été appliquée aux relevés de température "sèche" et "humide" effectués sous l'abri de la station et a conduit à l'estimation du taux d'humidité relative de l'air sous abri :

$$U\ \% = \frac{e\ (th) - 0{,}79\ (ta - th)}{e\ (ta)}$$

avec ta et th : les températures, sèche et humide du psychromètre (en °C)

e (t) : la tension de vapeur saturante à la température t (en°C)

$e\ (t) = t^3/1386 - t^2/286 + 0{,}71\ t + 4{,}8$

(d'après POUYAUD, Cah. ORSTOM, sér. Hydr. Vol XVI, 2, 1979)

La Fig. 9 présente l'évolution du taux d'humidité relative de l'air sous abri sur la rive sud du Lac Togo.

Les valeurs journalières de l'humidité relative (U) de l'air sous abri, varient entre le minimum de 58 % observé le 08-1-82 au plus fort de

l'harmattan et le maximum de 93 % observé le 18-07-82, à la fin de la grande saison des pluies (cf. tableau 3, paragraphe 2.1). L'impact de l'harmattan se traduit par une baisse très brutale de l'humidité relative début janvier et l'arrivée de la saison des pluies se traduit par une remontée progressive des valeurs surtout à partir de la fin du mois de mai bien que l'évolution soit déjà sensible depuis le fin du mois de février. On remarquera à plusieurs reprises, au cours de la période d'observation, l'inversion synchrone des pics d'insolation et d'humidité relative.

Les valeurs d'humidité relatives établies en bordure du Lac Togo ne sont pas contradictoires avec les valeurs interannuelles observées pour la région lagunaire du Togo : supérieure à 90 % à 8 heures, 70 à 80 % à 12 heures, 80 à 90 % à 18 heures (in Atlas Togo PNUD, 1982) ainsi qu'avec les relevés effectués dans la même zone climatique : en Côte d'Ivoire, humidité relative minimale de 70 % sans variation saisonnière notable, avec une légère augmentation de juin à août (in DURAND et CHANTRAINE, 1982) ; à Cotonou, au Bénin, humidité relative minimale de 69 %, en saison sèche et 75 % en saison humide (in TEXIER et al., 1979).

2.4 Durée de l'insolation

Les héliogrammes ont été dépouillés selon la méthode standard proposée par G. OBERLIN (ORSTOM, Hydr. Note technique n° 17 - 1968) et la Fig. 9 présente l'évolution des durées moyennes décadaires de l'insolation journalière, exprimées en heures par jour et relevées sur la rive sud du Lac Togo.

Les valeurs moyennes décadaires de la durée d'insolation journalière (S) varient entre le minimum de 2,5 heures/jour observé mi-juin 1982 et le maximum de 7,6 heures/jour observé fin septembre 1981, avec de fortes variations d'une décade à l'autre. L'impact de l'harmattan est nettement ressenti par une baisse de l'insolation début janvier 1982. D'autre part, l'arrivée de la saison des pluies se traduit par une baisse très importante et très brutale de l'insolation dès la fin de la deuxième quinzaine du mois de mai 1982, jusqu'à la deuxième quinzaine du mois de septembre 1982.

Les valeurs extrêmes de la durée d'insolation mensuelle calculée sur le Lac Togo : 226 heures/mois en octobre 1981 et 88 heures/mois en juin 1982,

sont du même ordre de grandeur que les valeurs moyennes extrêmes calculées sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire pour la période 1950/1979 : 201 heures/mois en mars et 78 heures/mois en août. (d'après MONTENY et LHOMME, 1980).

Le cycle saisonnier de la durée de l'insolation, caractéristique de la zone climatique, ainsi que la valeur de son amplitude annuelle, sont compatibles avec les observations effectuées sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire.

Une remarque, toutefois : deux périodes d'égale durée d'insolation peuvent très bien correspondre à des intensités de rayonnement solaire très différentes, en début et en fin de saison sèche, par exemple. (DURAND et CHANTRAINE, 1982).

2.5 Lames d'eau évaporées

2.5.1 Les mesures directes

Nous avons procédé au relevé quotidien des hauteurs d'eau évaporées au bac évaporatoire de la station d'Agbodrafo, et dont l'évolution est présentée sur la Fig. 9.

2.5.2 Les valeurs calculées

Nous avons choisi la formule de PENMAN, afin d'évaluer l'évapotranspiration ETP à la station d'Agbodrafo (RIOU, 1975). Cette méthode de calcul d'ETP, s'appui sur l'estimation du bilan radiatif Q, d'une petite surface gazonnée, d'albedo 20 % et le calcul de l'évaporation fictive d'une petite surface d'eau libre, prise à la même température que l'air, t_a. L'estimation de la valeur de l'évaporation E_p d'une nappe d'eau libre soumise aux mêmes conditions climatiques a été obtenue à partir de cette même formule en prenant une valeur d'albedo de 5 %, correspondant à une surface d'eau libre et en remplaçant la température de l'air sous abri, par la température moyenne de la surface du Lac. On constate que le rapport ETP/E_p est voisin de 0,82.

La Fig. 9 présente, en moyenne décadaire et en millimètre d'eau par jour, l'évolution saisonnière des valeurs des lames évaporées journalières,

mesurées à partir du bac évaporatoire (E BAC), ainsi que des valeurs journalières de l'évapotranspiration (ETP) calculées à la station d'Agbodrafo et de l'évaporation d'une nappe d'eau libre (E_p), estimées à partir de la formule de PENMAN.

La formule de PENMAN utilisée est de la forme :

$$ETP = \frac{\frac{\Delta Q}{L} + \gamma E_a}{\Delta + \gamma}$$

avec :

$$\Delta = \frac{e_a - e_s}{t_a - t_s}$$

e_h = la tension de vapeur saturante à la température "humide" th du psychromètre

e_a = la tension de vapeur saturante à la température de l'air mesurée sous abri = t_a (température sèche)

e_s = la tension de vapeur saturante à la température mesurée à la surface du bac = t_s

avec $e(t) = t^3/1386 - t^2/286 + 0,71\ t + 4,8$

Une expression de la pression de vapeur saturante à la température t (°C) (d'après POUYAUD, 1979).

$$E_a = E\ bac\ .\ \frac{(e_a - e_d)}{(e_s - e_d)}$$

La formule de l'évaporation fictive de DALTON, utilisée en l'absence d'anémomètre.

avec e_d = la tension de vapeur d'eau de l'air sous abri, sous pression atmosphérique moyenne de 1000 mb.

e_d = $e_h - 0,79\ (t_a - t_h)$
t_a et t_h, étant respectivement les températures "sèche" et "humide" du psychromètre.

E_{bac} = la hauteur d'eau évaporée mesurée au bac évaporatoire (en mm/jour).

Q = le rayonnement net en joules/cm²/jour.

$Q = G\ (1-a) - \sigma\ T_a^4\ (0,4 - 0,05.\ \sqrt{ed})\ (0,5 + 0,5.\ S/S_o)$

G = le rayonnement global calculé à l'aide du rayonnement global brut Go établi à l'entrée de l'atmosphère, et les coefficients empiriques de GLOVER.

$G = G_o . (0,29 \cos \lambda + 0,52 . S/S_o)$

λ = la latitude de la station

S = la durée de l'insolation journalière à la station déterminée à partir des héliogrammes.

S_o = la durée astronomique du jour

a = l'albedo de la surface considérée (0,2 pour une surface gazonnée - 0,05 pour une surface d'eau libre)

σ = la constante de STEPHAN - BOLTZMAN égale à $4.9 . 10^{-3}$ Joule/m²/K⁴/Jour.

T_a = la température absolue de l'air sous abri.

L = la chaleur latente de vaporisation de l'eau égale à $2.508 . 10^6$ Joule/kg.

γ = la constante psychrométrique égale à 0,79.

En ce qui concerne les valeurs des lames d'eau évaporées, on constatera la grande irrégularité des valeurs mesurées directement au Bac évaporatoire, ce qui peut s'expliquer par les effets conjugués de l'imprécision des lectures et la plus grande sensibilité du bac aux variations des conditions climatiques environnantes.

Les valeurs estimées de l'évaporation E_p, présentent, au contraire, une plus grande régularité saisonnière et apparaissent évidemment très liées à l'évolution de la température de l'air mesurée sous abri. L'impact de l'harmattan semble négligeable sur les lames d'eau évaporées, et l'arrivée de la saison humide se traduit par une réduction progressive de ces valeurs, qui intervient dès la mi-mars, jusqu'à la mi-juin, en fonction essentiellement des fluctuations des températures de l'air et de l'eau du bac en surface.

Les valeurs extrêmes de la lame d'eau évaporée journalière E_p, estimées par la formule de PENMAN en moyenne décadaire, sont de 3,44 mm/jour à la mi-juin 1982, et de 5,60 mm/jour à la mi-octobre 1981.

Les valeurs mensuelles extrêmes de l'évapotranspiration (ETP) calculées à la station d'Agbodrafo : 87 mm/mois en juin 1982 et 138,5 mm/mois en mars 1982, sont du même ordre de grandeur que les valeurs moyennes mensuelles extrêmes d'ETP, calculées sur la période 1968 - 1979 par la formule de PENMAN à la station d'Adiopodoumé en Côte d'Ivoire : 86,1 mm/mois en août et 141,8 mm/mois en mars (d'après MONTENY et LHOMME, 1980) ; elles apparaissent très inférieures

toutefois aux valeurs d'ETP moyennes mensuelles extrêmes, calculées à la station de Lomé - aéroport par la formule de PENMAN : 106 mm/mois en juin et 179 mm/mois en mars (d'après l'Atlas Togo, PNUD, 1982).

L'étude de ces quelques paramètres climatiques fondamentaux conduit à deux remarques :

- l'appartenance de la région lagunaire du Sud-Togo à un régime climatique de type équatorial de transition à tendance sèche.
- un net déficit pluviométrique au cours des années 1981 et 1982 qui n'apparaissent qu'avec une seule saison humide, ce qui induira d'importants bouleversements dans le régime hydrodynamique annuel de la lagune.

3 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES DU SYSTEME LAGUNAIRE

3.1 Le régime des tributaires principaux : le Sio et le Haho

3.1.1 Le Sio : Avec une longueur de 176 km, un bassin versant de 2800 km^2 à son embouchure, prenant sa source à 800 mètres d'altitude dans les hauteurs du plateau de Daye (chaîne de l'Atacora) fortement arrosées (cf. § 2) et recouvertes en partie par la forêt dense humide sempervirente, qui bordent le Togo à son extrémité sud-ouest, le Sio est le principal tributaire du Lac Togo à l'ouest du système lagunaire, caractérisé essentiellement par l'importance relative de son débit et la permanence de son écoulement. Le débit moyen interannuel à l'embouchure est estimé à 9,9 m^3/s en année médiane ; à 26,3 m^3/s en année décennale humide ; et à 3,9 m^3/s en année décennale sèche. La pointe de crue médiane est estimée à 108 m^3/s et la crue décennale à 201 m^3/s à l'embouchure.

(d'après Atlas Togo PNUD, 1982 et utilisation des rapports proportionnels de superficie)

3.1.2 Le Haho : Avec un bassin versant légèrement plus important que le Sio de 3400 km^2, mais prenant sa source dans une région plus aride à savane arborée, le Haho est le second tributaire du Lac Togo, dans la partie nord du système et est caractérisé par l'intermittence saisonnière de son écoulement. La durée de la période sans écoulement est estimée à 30 jours en année décennale humide , à 85 jours en année médiane et à 130 jours en année décennale sèche. Le

débit moyen interannuel à l'embouchure est estimé à 5,8 m^3/s en année médiane , à 16,6 m^3/s en année décennale humide et à 2,1 m^3/s en année décennale sèche. La pointe de crue médiane est estimée à 66 m^3/s et la crue décennale à 93 m^3/s à l'embouchure.

(d'après Atlas Togo PNUD, 1982 et utilisation des rapports proportionnels de superficie)

3.2 Le plan d'eau du Lac Togo proprement dit

3.2.1 Variations saisonnières des cotes du plan d'eau

a - L'évolution du niveau du plan d'eau du Lac Togo a été suivie à partir des relevés effectués aux stations de Sevatonou et de Kpémé, puis à la station d'Agbodrafo à partir du 15-07-81, qui s'est avéré être corrélée de façon excellente avec la station de Kpémé. Cette dernière installée depuis le 01 février 1960 sera par conséquent retenue pour l'observation limnimétrique à long terme du Lac Togo. La cote du zéro de l'échelle de Sevatonou est à -0,02 m IGN et la cote du zéro de l'échelle de Kpémé est à -0,143 m IGN. La Fig. 10 présente la corrélation établie entre les échelles d'Agbodrafo et de Kpémé.

b - La Fig. 11 présente les variations de la surface du plan d'eau du Lac, exprimées en cote du Nivellement Général du Togo (IGN), au cours de la période d'étude, comparée à l'évolution du plan d'eau au cours des années 1968 et 1961, années respectivement de crue maximale et de déficit maximal observés depuis la création de la station de Kpémé.

Il apparaît sur la Fig. 11 que les années d'étude 1981 et 1982 ont bien été des années moyennes en ce qui concerne la hauteur du plan d'eau du Lac Togo, caractérisées par un seul maximum contrairement à la plupart des autres années où l'on observe un pic début juillet et un autre pic plus faible à la fin septembre.

En 1981 on n'aura observé que le second pic avec le maximum du plan d'eau à 1,84 m IGN le 02-10-81.

En 1982, par contre seul le premier pic aura été observé avec le maximum du plan d'eau à 2,16 m IGN le 21-07-82. Les minima du plan d'eau ont été observés respectivement le 04-04-81 à 0,45 m IGN et le 25-02-82 à 0,56 m IGN. Le marnage annuel du Lac aura été de 1,39 m en 1981 et de 1,60 m en 1982.

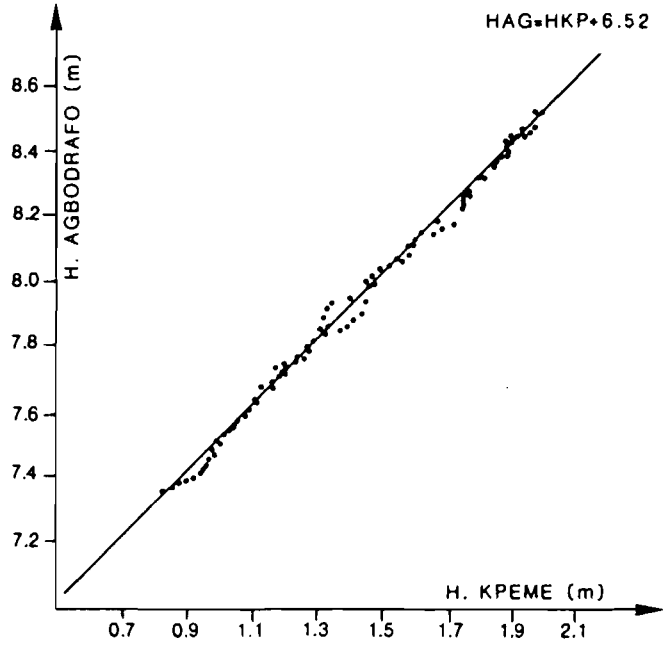


Fig-10

CORRELATION LINEAIRE ENTRE LES LECTURES DES STATIONS LIMNIMETRIQUES D'AGBODRAFO ET DE KPEME

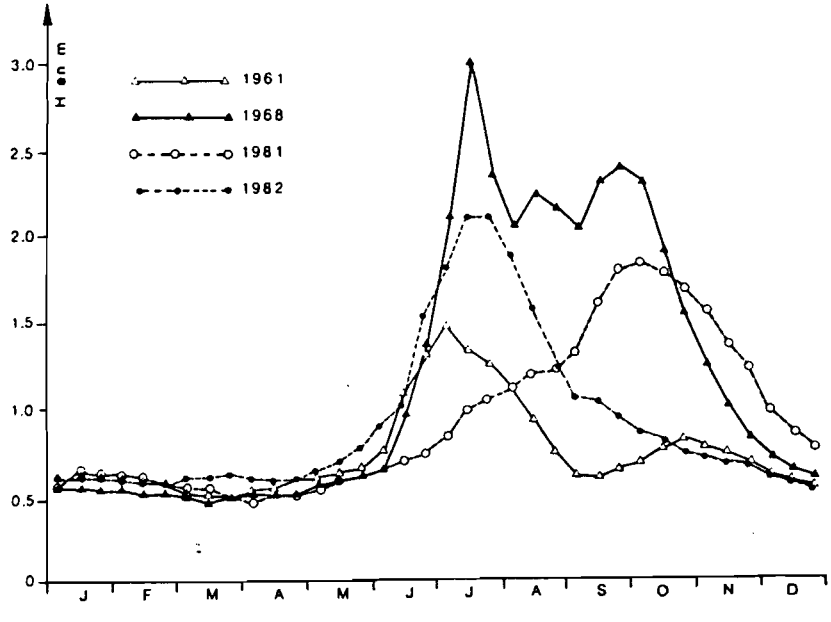


Fig-11

VARIATIONS DU PLAN D'EAU DU LAC TOGO STATION DE KPEME-COTES I.G.N-MOYENNES DECADAIRES

La cote maximale atteinte par la plus grande crue du Lac Togo à la station de Kpémé depuis sa création a été de 3,24 m IGN le 17-07-68.

La cote minimale d'étiage observée à la station de Kpémé depuis sa création a été de 0,19 m IGN, le 11-04-83.

Le marnage annuel maximum probable à l'issue des 24 dernières années d'observation est donc de 3,05 m.

Le marnage annuel maximum observé a été de 2,78 m en 1968.

La cote atteinte par la plus petite crue du Lac à la station de Kpémé, est de 1,52 m IGN le 07-07-61. Le marnage annuel minimum observé du Lac a été de 1,04 m en 1961.

On constate d'une façon générale que si la variation interannuelle de la cote du plan d'eau est très importante en période de crue, elle devient négligeable pour la période d'étiage s'étendant de janvier à avril.

Le tableau 4, présente les cotes maximales et minimales annuelles (IGN) du plan d'eau observées à la station de Kpémé depuis sa création, ainsi que les dates d'ouverture du cordon lagunaire d'Aneho, le cas échéant. On remarquera l'importante variation interannuelle des crues sur le Lac, ainsi que la grande irrégularité avec laquelle il a été procédé à l'ouverture du cordon lagunaire, lorsque cette ouverture a eu lieu. L'effet de la décrue peut être immédiat au niveau de la station de Kpémé ou retardé d'un jour ou deux. La décrue se manifeste assez violemment durant les premiers jours qui suivent l'ouverture, à raison d'une vingtaine de centimètres par jour à Kpémé et peut atteindre 1 mètre par jour à la station du pont de Zébé.

Année	Cote minimale d'étiage (m IGN)	Cote maximale de crue (m IGN)	Date de crue max.	Date de l'ouverture sur la mer à Aneho
1983	0,19	1,85	03-10-83	0
1982	0,56	2,16	21-07-82	0
1981	0,45	1,84	2-10-81	0
1980	0,44	2,67	18-09-80	16-09-80
1979	0,46	2,72	31-07-79	31-07-79
1978	0,48	1,65	27-06-78	0
1977	0,51	1,63	23-09-77	0
1976	0,59	1,56	5-11-76	0
1975	0,53	1,65	10-07-75	10-07-75
1974	0,50	1,89	25-09-74	(21-11-74 H = 1,51)
1973	0,48	2,25	10-10-73	0
1972	0,51	1,93	1-07-72	1-07-72
1971	0,52	1,68	28-08-71	24-08-71
1970	0,51	2,36	10-10-70	0
1969	0,54	1,72	5-10-69	0
1968	0,46	3,24	17-07-68	16-07-68
1967	0,54	1,84	18-06-67	0
1966	0,48	2,20	17-09-66	29-09-66
1965	manque	manque		
1964	0,45	2,44	7-07-64	7-07-64
1963	0,48	2,89	29-07-63	29-07-63
1962	0,49	2,38	15-06-62	15-06-62
1961	0,48	1,52	7-07-61	0
1960	0,48	2,65	6-10-60	4-10-60

Tableau 4 : Variations maximales interannuelles du plan d'eau du Lac Togo.
Station de Kpémé - Cotes IGN (m)

3.2.2 Bathymétrie du Lac Togo (cf. carte topographique, Fig. 12)

Plusieurs campagnes bathymétriques ont été effectuées au cours de l'année 1981. Afin de réduire l'erreur systématique effectuée à chacune des mesures, nous avons établi pour chaque station le diagramme d'évolution de la profondeur mesurée à la station avec les hauteurs lues à l'échelle limnimétrique d'Agbodrafo au cours de la même période. La comparaison deux à deux de ces diagrammes nous a permis d'obtenir avec une certaine précision la différence de profondeur existant entre chaque station de mesure.

D'autre part, devant la faiblesse de la pente de ligne d'eau entre les stations limnimétriques de Sevatonou et de Kpémé (moyenne de $2.5 \cdot 10^{-5}$ en 1981), situées aux deux extrémités nord et sud du Lac Togo et considérant cette pente régulière entre ces deux stations, nous avons estimé la cote moyenne IGN de la surface du plan d'eau du Lac Togo, comme la moyenne arithmétique des cotes IGN de la surface de l'eau à ces deux stations.

Nous avons pu ainsi établir la carte topographique du fond du Lac Togo, en cote IGN, qui est présentée sur la Fig. 12.

Le tableau suivant indique la répartition proportionnelle des différentes altitudes moyennes du fond du Lac, ramenée à la surface totale du fond. L'altitude moyenne de la rive (0,66 m IGN), a été déduite de la valeur de la cote moyenne de la surface du Lac en 1961, qui est l'année du plus faible marnage observé depuis la création des stations.

Altitude moyenne IGN (m)	% de la surface totale
+0,16	27,3
-0,60	12,7
-0,80	20,4
-0,95	13,6
-1,05	6,4
-1,10	13,3
-1,25	2,75
-1,35	3,6

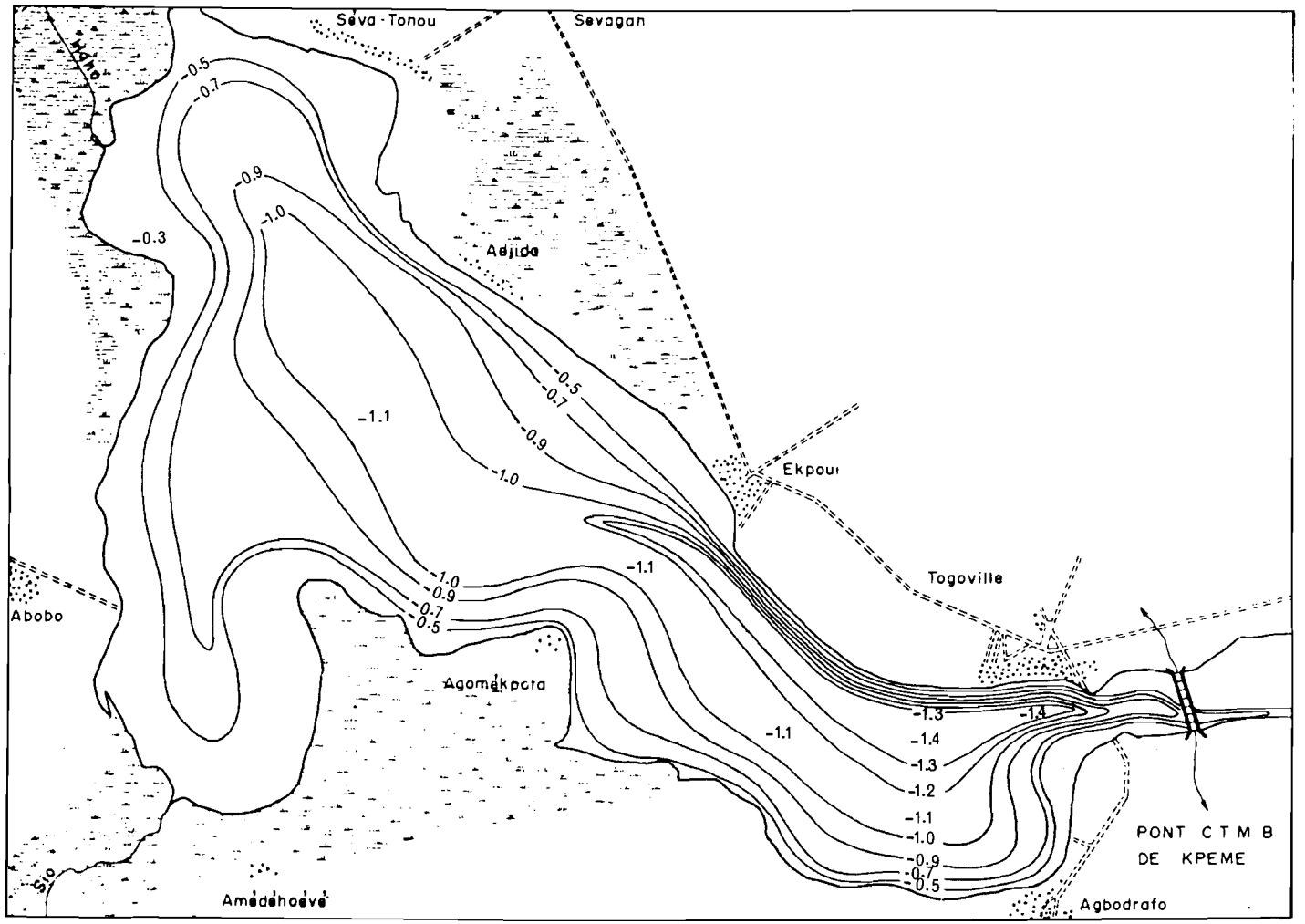


Fig-12 TOPOGRAPHIE DU FOND DU LAC TOGO EN COTES IGN (m)

La cote moyenne du fond du Lac a été calculée d'après la carte topographique du fond (Fig. 12), et estimée à -0,621 m IGN. Parallèlement, la cote moyenne du fond du Lac a été calculée indépendamment, à partir de chaque volumétrie du Lac obtenue après chaque campagne de mesures en 1981. La valeur moyenne qui résulte de cette dernière méthode est de -0,623 m IGN, avec un écart à la moyenne de 2 %. Nous pourrons donc utiliser la valeur de -0,622 m, comme cote moyenne du fond du Lac, dans l'estimation ultérieure des volumes.

Sur la Fig. 12, on remarque la présence d'une vaste cuvette dans le nord du Lac, dont le fond occupe une position centrale à l'altitude -1,10 m IGN. La partie sud du Lac, au contraire, se présente comme un plan incliné régulièrement vers le nord-est, se terminant en une étroite dépression s'étendant d'Ekpoui à Togoville, dont le point le plus bas se situe devant Togoville à l'altitude -1,4 m IGN, qui est l'endroit le plus profond du Lac. Une sorte de chenal très étroit prend naissance à l'entrée du bras lagunaire devant Togoville mais disparaît rapidement vers l'est, où les altitudes minimales des fonds ne sont jamais inférieures à -0,6 m IGN, et se situent toujours à proximité immédiate de la rive sud du bras lagunaire.

3.2.3 Volumétrie du Lac Togo

La connaissance de la cote moyenne du fond du Lac d'après les études topographiques précédentes, et la connaissance de la cote moyenne de la surface du plan d'eau d'après les lectures des échelles limnimétriques, permettent l'estimation du volume du Lac à partir d'une lecture effectuée à une échelle limnimétrique déterminée. La Fig. 13 présente la droite de relation entre les lectures des échelles de Kpémé et d'Agbodrafo et le volume du Lac Togo.

Les quelques formules suivantes précisent les relations existantes entre les différents paramètres limnimétriques et volumétriques :

Ha, la hauteur d'eau lue à l'échelle d'Agbodrafo (en mètre).
Hk, la hauteur d'eau lue à l'échelle de Kpémé (en mètre).
hk, la cote IGN des hauteurs d'eau à l'échelle de Kpémé (m).
A , la cote moyenne de la surface du Lac (IGN).
V , le volume du Lac, en millions de m^3.
P , la profondeur moyenne du Lac Togo (en m).

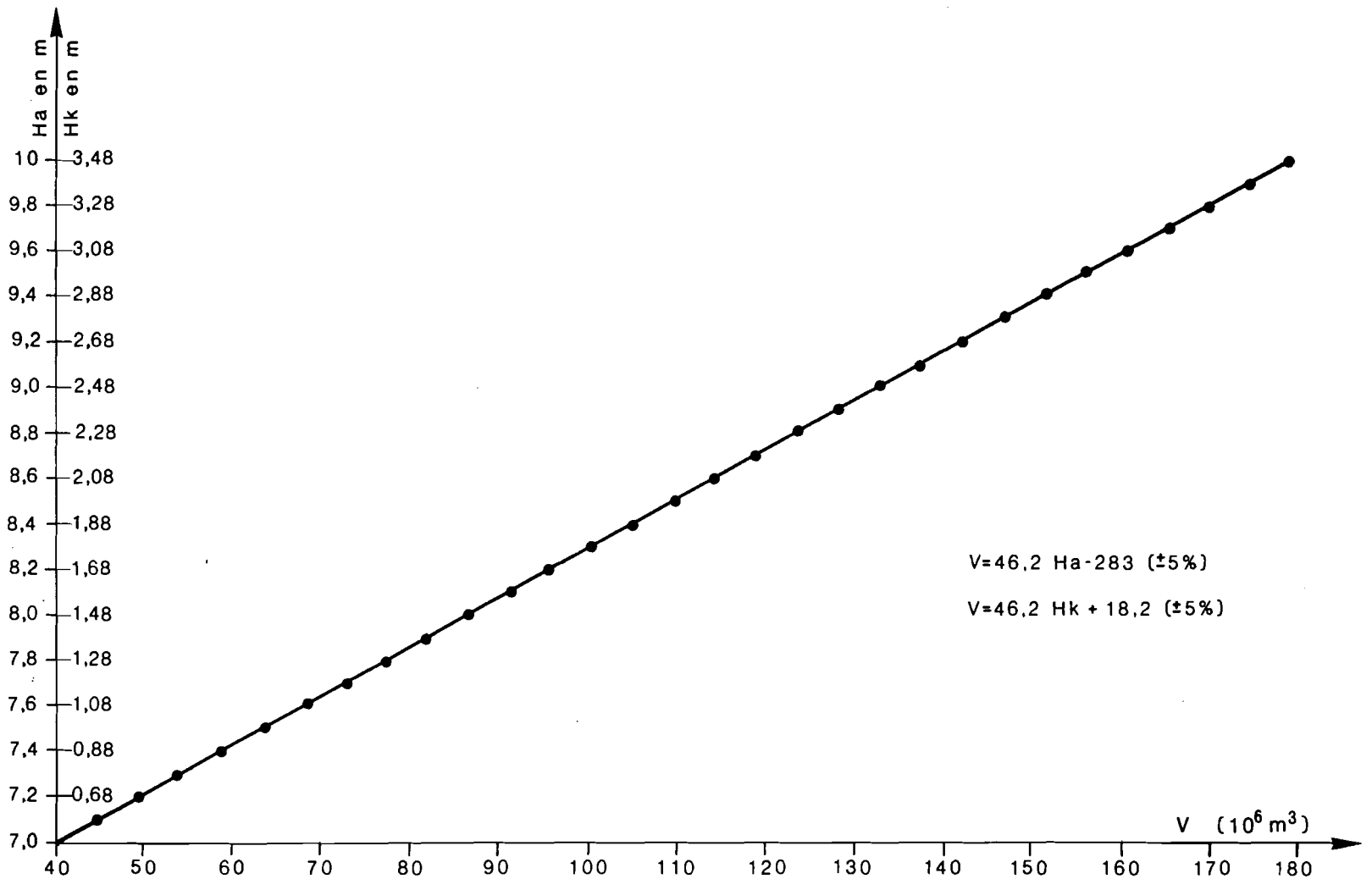


Fig-13 CORRELATION ENTRE LES HAUTEURS LUES AUX ECHELLES D'AGBODRAFO Ha (m) ET DE KPEME Hk (m) ET LE VOLUME DU LAC TOGO V ($10^6 m^3$)

$$Hk = Ha - 6,52$$
$$A = Ha - 6,75 = Hk - 0,23 = hk - 0,087$$
$$V = 46,2 \cdot Ha - 283 = 46,2 \cdot Hk + 18,2$$
$$P = A + 0,622$$

La précision estimée sur le volume est de l'ordre de 1 %.

3.2.4 Tentative de bilan hydrologique

3.2.4.1 Définition des termes du bilan

Nous avons limité l'estimation du bilan au plan d'eau constitué par le Lac Togo stricto sensu, s'étendant entre les embouchures du Sio et du Haho et un exutoire que nous avons situé au niveau d'une section transversale du chenal lagunaire devant Togoville (cf. Fig. 5).

Cette étude a pour objet de quantifier les volumes mis en jeu au cours d'un cycle complet du Lac et d'en définir les importances relatives en fonction de leurs origines diverses.

En ce qui concerne les apports, nous avons considéré le volume mensuel précipité sur le plan d'eau du Lac ss. et les volumes mensuels écoulés dans la Lili (affluent du Haho), le Haho proprement dit et le Sio. Nous avons négligé les apports du ruissellement des berges et les apports souterrains très difficilement quantifiables avec précision. Les volumes écoulés ont été estimés à partir des débits moyens journaliers calculés au niveau de trois stations de contrôle étalonnées, situées à Togblékopé sur le Sio à 24 km en amont de son embouchure sur le Lac ; à Gati sur le Haho, à 26 km en amont de son embouchure et à Agbatopé sur la Lili, à 18 km en amont de sa confluence avec le Haho. Nous avons réactualisé l'étalonnage de ces trois stations par une série de jaugeages effectués de juin 81 à septembre 82. A partir des volumes écoulés au niveau de chacune de ces stations, nous avons estimé les volumes écoulés aux embouchures du Sio et du Haho sur le Lac, en utilisant la proportionnalité entre les volumes écoulés à deux stations d'un même cours d'eau et les superficies des bassins respectifs de ces deux stations.

Les coefficients correctifs utilisés sont de 2,266 pour la Lili (jusqu'à sa confluence avec le Haho), de 1,150 pour le Haho et de 1,111 pour le Sio.

En ce qui concerne les pertes, nous avons considéré le volume mensuel évaporé sur le plan d'eau du Lac. Par déduction des termes précédemment décrits, nous avons estimé le déficit mensuel du bilan, qui représente l'ensemble des pertes par infiltration, et par écoulement dans la lagune à l'exutoire du Lac devant Togoville. L'élaboration d'un petit modèle expérimental nous a permis ensuite d'estimer un ordre de grandeur de l'infiltration dans le Lac Togo et du volume des échanges avec la lagune (cf. § 3.1.4.2).

Le tableau 5 regroupe l'ensemble des termes du bilan :

P	représente la lame d'eau mensuelle précipitée sur le Lac en mm
E	représente la lame d'eau journalière évaporée sur le Lac en mm
H_p et H_e	représentent les lames d'eau mensuelles précipitées et évaporées sur le Lac, en mètre.
V_p et V_E	les volumes mensuels précipités et évaporés sur le Lac en millions de m^3.
V_{Lili}, V_{Haho}, V_{Sio}	Les volumes mensuels écoulés dans la Lili à sa confluence avec le Haho ; dans le Haho ss. et dans le Sio, à leurs embouchures sur le Lac, en millions de m^3.
$(V_L + V_H)$	représente la somme des apports mensuels de la Lili et du Haho ss., au niveau de l'embouchure du Haho.
V_R	représente le volume total mensuel écoulé dans le Lac par ses tributaires, exprimé en million de m^3.
ΔV	représente la variation du volume du Lac en millions de m^3.
V_D	représente le déficit du bilan : somme des pertes par infiltration et par écoulement dans le bras lagunaire à l'est de Togoville, en millions de m^3.

Le bilan s'écrit :

$$V_D = V_R + V_p - V_E - \Delta V$$

Dans tous ces calculs, la surface du Lac proprement dit, a été considérée constante et égale à $46,2 \cdot 10^6$ m^2, ce qui est une approximation importante.

	Pmm	Emm/j	H_p (m)	H_e (m)	V_p	V_E	V_{Lili}	V_{Haho}	V_{Sio}	V_L+V_H	VR	ΔV_{Lac}	V_D
1981 (JUIN)	-	-	-	-	-	-	7,83	7,51	11,63	15,34	27	6,47	-
JUIL.	51	3,91	, 051	,122	2,35	5,60	8,02	29,2	44,0	37,18	81,2	13,9	64
AOUT	43,2	4,23	,0432	,132	1,99	6,06	0,73	18,3	29,2	19,07	48,2	9,24	34,9
SEPT.	121	5,07	, 121	,153	5,59	7,03	12,12	56,3	63,7	68,47	132	26,80	104
OCT.	120	5,53	, 120	,172	5,54	7,92	1,79	28	37,1	29,84	66,9	-12,9	77,4
NOV.	21,7	4,77	,0217	,143	1,00	6,61	0,91	4,14	10,10	5,05	15,1	-22,2	31,7
DEC.	0	4,98	0	,154	0	7,13	0	1,22	2,01	1,22	3,23	-19,40	15,5
1982 JAN.	11,2	5,02	,0112	,156	0,52	7,19	0	1,59	1,58	2,32	3,17	- 3,23	- 0,27
FEV.	9,5	5,11	,0095	,143	0,44	6,61	0	0,00	1,43	0,00	1,43	- 2,31	- 2,43
MARS	53,7	5,46	,0537	,170	2,48	7,82	0	0	2,98	0	2,98	3,23	- 5,59
AVR.	111	5,03	,1106	,151	5,11	6,97	0,51	0,14	1,94	0,14	2,59	- 0,92	1,65
MAI	228,2	4,70	,2282	,146	10,5	6,73	2,84	2,55	4,59	5,38	9,98	8,78	4,97
JUIN	448,0	3,59	, 448	,107	20,70	4,97	6,88	12,42	11,7	19,32	31	37,4	9,33
JUIL.	94,7	4,08	,0947	,126	4,37	5,84	23,84	51,8	70,1	75,61	146	19,40	125
AOUT	10,0	3,85	, 010	,120	0,46	5,51	0,26	1,77	6,45	2,03	8,48	-39,3	42,7
SEPT.	13,9	4,57	,0139	,138	0,64	6,33	0,70	0,96	7,32	1,66	8,98	-14,3	17,6
OCT.	38,6	5,32	,0386	,165	1,78	7,62	0,58	0,34	4,60	0,92	5,52	- 6,47	6,15
NOV.	1,35	5,34			0,062	7,4	0,018	0,2	1,24		1,46	- 4,16	- 1,16
DEC.	0,92	4,87			0,042	6,97	0	0,005	0,03		0,035	- 1,85	- 5,04

Tableau 5 : Paramètres du bilan hydrologique du Lac Togo.
Tous les volumes V sont exprimés en millions de m^3.

Nous retrouvons dans les résultats du tableau 5, la grande variation interannuelle entre 1981 et 1982, qui présentent un décalage de leur unique saison de crue, voisin de deux mois, l'arrière saison pluvieuse de septembre et octobre ayant été très déficitaire en 1982.

D'autre part, le calcul met en évidence des valeurs négatives du "déficit" V_D au cours des mois d'étiage minimum du Lac, ($V_D = -2,43 \cdot 10^6$ m³ en février 1982 et $V_D = -5,59 \cdot 10^6$ m³ en mars 1982).

Ces valeurs négatives révèleraient l'existence d'un <u>apport extérieur au Lac</u>, souterrain ou plus probablement en provenance de la lagune de Togoville dont les eaux pourraient se déplacer lentement vers le Lac, au cours de l'étiage. La détermination des pertes par infiltration dans le Lac, devient donc essentielle quant à l'étude plus précise de ces échanges entre le Lac et la lagune.

3.2.4.2 Estimation de l'infiltration

Nous avons considéré que la hauteur d'eau infiltrée sur une surface élémentaire ds du fond, à l'instant t, ne dépendait ni de l'épaisseur de la tranche d'eau du Lac sur cette surface ds, ni de la nature du fond.

Soit le système d'équations suivant :

$$* \ \Delta M_T = \iiint_t Ci \, dx.dy.dz - \iiint_{t-1} Ci \, dx.dy.dz$$

$$* \ \Delta M_T = -K_T.T. \frac{[\iint_t Ci.dx.dy + \iint_{t-1} Ci.dx.dy]}{2} + V_o . \frac{[C_t + C_{t-1}]}{2} + M'_T$$

$$* \ V_D = I_T - V_o = K_T. S. T - V_o$$

avec : ΔM_T = la variation de la masse saline dissoute dans l'ensemble du Lac Togo, au cours de la période $T = t - (t-1)$.

C_i = la concentration saline moyenne de l'eau, sur une verticale i, définie sur le Lac.

K_T = la lame d'eau infiltrée dans le Lac Togo au cours de la période T.

V_o = le volume d'eau apporté au Lac Togo par la lagune de Togoville.

C_t = la concentration moyenne des eaux lagunaires transitant vers le Lac Togo, à la date t.

M'_T = la masse de sel apportée au Lac Togo par le Sio et le Haho, au cours de la période T.

V_D = le volume des pertes globales issu du bilan hydrologique.

I_T = le volume infiltré dans le Lac Togo au cours de la période T.

S = la surface totale du Lac Togo.

Nous pouvons déduire de ce système d'équation, les valeurs de la lame infiltrée dans le Lac Togo K, ainsi que le volume V_o échangé entre le Lac et la lagune de Togoville.

Nous avons établi le modèle précédent entre le 1° janvier et le 30 juin 1982 en calculant les masses de sel par intégration successive à partir d'un réseau de verticales défini sur l'ensemble du Lac Togo, préalablement découpé en 43 sections transversales, dont le tracé est reporté en Annexe III.

PERIODES	INFILTRATION DANS LE LAC TOGO EN MM/JOUR	APPORT EN PROVENANCE DE LA LAGUNE EN 10^6. m^3
du 1-1-82 au 26-1-82	3,1	4,3
du 26-1-82 au 24-2-82	2,3	9,1
du 24-2-82 au 31-3-82	2,0	17,0
du 31-3-82 au 30-4-82	0,5	2,9
du 30-4-82 au 27-5-82	0,5	- 0,8
du 27-5-82 au 30-6-82	-1,0	-22,0

Tableau 6 : Estimation des valeurs de l'infiltration dans le Lac Togo, et des volumes échangés entre le Lac et la lagune de Togoville, au cours de l'étiage 1982.

On notera la diminution progressive des valeurs de la lame d'eau infiltrée dans le Lac Togo, entre le 1° janvier et la fin mai, puis, une valeur négative au mois de juin, en début de saison des crues.

Les apports lagunaire augmentent jusqu'au mois de mars, au moment de l'étiage minimum, puis régressent et le mouvement s'inverse dès l'arrivée de la saison des crues (valeurs négatives).

Les variations de la lame d'eau infiltrée au cours de l'étiage peuvent provenir des erreurs d'estimation sur le volume ruisselé qui est le paramètre du bilan, le plus délicat à déterminer. En effet, le volume ruisselé comprend les apports écoulés dans les tributaires, qui sont déjà estimés avec une certaine imprécision et le ruissellement direct des berges qui est un phénomène diffus, quasiment impossible à évaluer précisément.

Si l'on considère la période où l'erreur sur le volume ruisselé est moindre, c'est-à-dire au mois de février au cours duquel la pluviométrie est minimale et l'écoulement des tributaires presque nul, on peut prendre la valeur de lame infiltrée de 2,5 mm/jour comme étant une valeur de référence plausible. Par rapport à cette référence, il devient possible de calculer pour chaque période, le déficit des apports au Lac laissé par le calcul précédent et de l'attribuer au ruissellement direct des berges. En planimétrant la surface concernée par ce ruissellement et en reprenant la pluviométrie du Lac, on calcule le coefficient théorique de ruissellement des berges.

PERIODE	VOLUME PRECIPITE SUR LES RIVES 10^6 m^3	DEFICIT DES APPORTS RUISSELES 10^6 m^3	COEFF. THEORIQUE DE RUISSELLEMENT DES BERGES
JAN. 82	0,26	-0,8	-
FEV.	0,06	0,26	-
MARS	1,42	0,8	56 %
AVRIL	2,54	2,8	-
MAI	5,25	2,5	48 %
JUIN	10,30	5,5	53 %

On déduit de ces résultats les quelques constatations suivantes :

- aux mois de mars, mai et juin, les apports qui pourraient vraisemblablement provenir d'un ruissellement direct des berges seraient suffisants pour venir restaurer dans le modèle une valeur de l'infiltration voisine de

2,5 mm/jour dans le Lac. Mais ces coefficients de ruissellement sont trop élevés et non crédibles, ne représentant ici qu'une valeur théorique, destinée à situer le degré d'incertitude de l'estimation des apports ruisselés.

- au mois de février, si l'on considère un coefficient de ruissellement moyen de 50 % sur les berges, on en déduit un déficit des apports qui correspondrait à une sous-estimation plausible des débits moyens journaliers des tributaires de 90 litres/seconde, c'est-à-dire une erreur de 16 % sur le débit journalier du Sio (seul tributaire actif à cette époque).

- au mois d'avril, si l'on se place dans les mêmes conditions qu'en février, le déficit des apports correspondrait à une sous-estimation des débits moyens journaliers du Sio et du Haho réunis, de 580 litres/seconde, c'est-à-dire une erreur de 73 %, ce qui est encore plausible.

3.2.4.3 Conclusions

Il ressort de cette tentative de bilan hydrologique, les quelques remarques suivantes :

a - La lame d'eau infiltrée dans le Lac Togo n'apparaît pas comme un terme négligeable dans l'établissement du bilan et son ordre de grandeur le plus probable de l'ordre de 2 à 3 mm/jour, représenterait tout de même la moitié des pertes par évaporation estimées à la même époque.

b - Les apports ruisselés apparaissent comme un terme particulièrement entaché d'erreur, et pour deux raisons principales :

. la difficulté d'estimer les volumes écoulés dans les tributaires, conduit le plus souvent à une sur-estimation des volumes d'étiage et à une sous-estimation des volumes de crue. On repose ainsi les problèmes de la précision des étalonnages de basses eaux, de l'observation des écoulements d'étiage et des lacunes dans l'enregistrement des crues.

. l'apport par ruissellement direct des berges n'apparaît pas comme un terme vraiment négligeable a priori et l'évaluation trés aléatoire de ce phénomène diffus peut être à l'origine d'un important déficit dans le bilan hydrologique.

c - L'existence d'apports en provenance de la lagune vers le Lac Togo semblerait avoir été confirmée par le modèle précédent et ce déplacement des eaux remontant vers le Lac, serait susceptible de favoriser la progression du front salé d'étiage. Les valeurs suivantes donnent une idée de l'ampleur du phénomène, d'après les résultats du modèle, à l'étiage minimum :

PERIODE	APPORT DE LA LAGUNE AU LAC TOGO (10^6 m^3)	DEBIT MOYEN JOURNALIER DEVANT TOGOVILLE (m^3/s)	VITESSE MOYENNE A TRAVERS LA SECTION DE TOGOVILLE (mm/s)
JAN. 1982	4,3	2,0	2
FEV.	9,1	3,6	4
MARS.	17,0	5,6	6

On notera l'intensification de cette remontée des eaux vers l'amont au cours de l'étiage minimum, ce qui coïncidera avec les observations de l'évolution du front salé.

d - Le bilan proposé permet en outre de constater un renouvelement théorique total des eaux du Lac, au cours d'un cycle hydrologique.

Les apports ruisselés et précipités, tels qu'ils ont été estimés (tableau 5), entre les mois de juin et octobre 1981, représentent 8 fois le volume d'étiage minimum du Lac au mois d'avril 1981 et les apports estimés entre les mois de juin et octobre 1982, représentent 4,5 fois le volume d'étiage minimim du Lac au mois de février 1982. Cette importance relative du volume des eaux continentales par rapport au volume lagunaire, peut être, toute proportion gardée, considérée comme du même ordre de grandeur qu'en ce qui concerne les lagunes Ebrié et Aby en Côte d'Ivoire. (DURAND et CHANTRAINE, 1982).

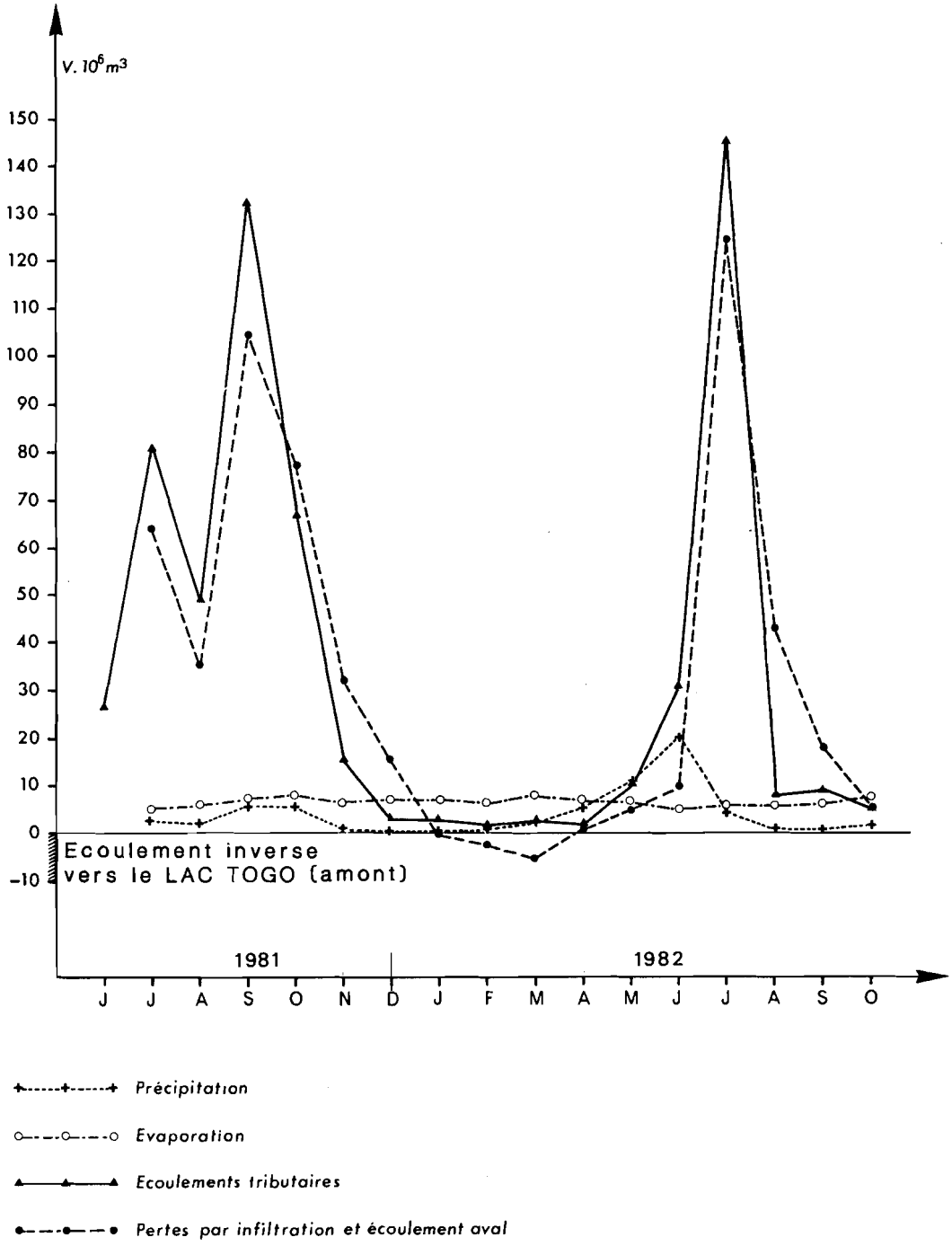


Fig-14

EVOLUTION SAISONNIERE COMPAREE DES DIFFERENTS PARAMETRES DU BILAN HYDROLOGIQUE DU LAC TOGO

e - Si l'on considère le Lac Togo, en régime stationnaire sur de courtes périodes, on peut approcher un ordre de grandeur du temps de résidence théorique des eaux dans le Lac qui est de 37 jours au cours de la période de crue en 1981 (juin à octobre), de 66 jours au cours de la période de crue en 1982 (juin à octobre) et voisin de 4 ans au cours de l'étiage 1981-1982 (novembre 81 à mai 82).

f - La Fig. 14 présente les variations comparées des termes du bilan du Lac Togo au cours de la période d'étude. On notera la régularité des pertes par évaporation, bien que certaines variations soient peut être masquées par l'imprécision de la méthode d'évaluation. On notera aussi l'importance des volumes écoulés dans les tributaires, qui conditionnent étroitement les volumes écoulés à l'exutoire. Le rôle de stockage du Lac se manifeste chaque année au moment de la décrue rapide, lorsque le Lac entretient un écoulement de "vidange" généralement au cours des deux mois qui suivent la fin des écoulements des tributaires. (novembre et décembre 1981 - août et septembre 1982).

Bien que très imprécis et négligeant les variations de surface du Lac, il semble que le bilan proposé, représente une bonne estimation de l'ordre de grandeur des phénomènes en présence qui conditionnent le régime hydrologique du Lac Togo proprement dit.

Il souligne l'importance de l'écoulement des tributaires dans les variations du volume écoulé dans les bras lagunaires avals, ainsi que l'importance non négligeable de l'infiltration des eaux dans le Lac. Il révèle d'autre part, des échanges entre le Lac et la lagune de Togoville, mettant ainsi en évidence les interconnexions étroites entre le Lac proprement dit et le système lagunaire aval, pouvant être soumis lui-même au régime du fleuve Mono ou bien à une influence marine, ce qui ne peut pas rester sans conséquence sur la qualité des eaux du Lac.

3.3 Les bras lagunaires

3.3.1 Profils en travers

La Fig. 16 présente les profils en travers de quatre sections situées sur le bras lagunaire qui s'étend vers l'est de Togoville au pont de Zalivé et dont les emplacements sont reportés sur la Fig. 15.

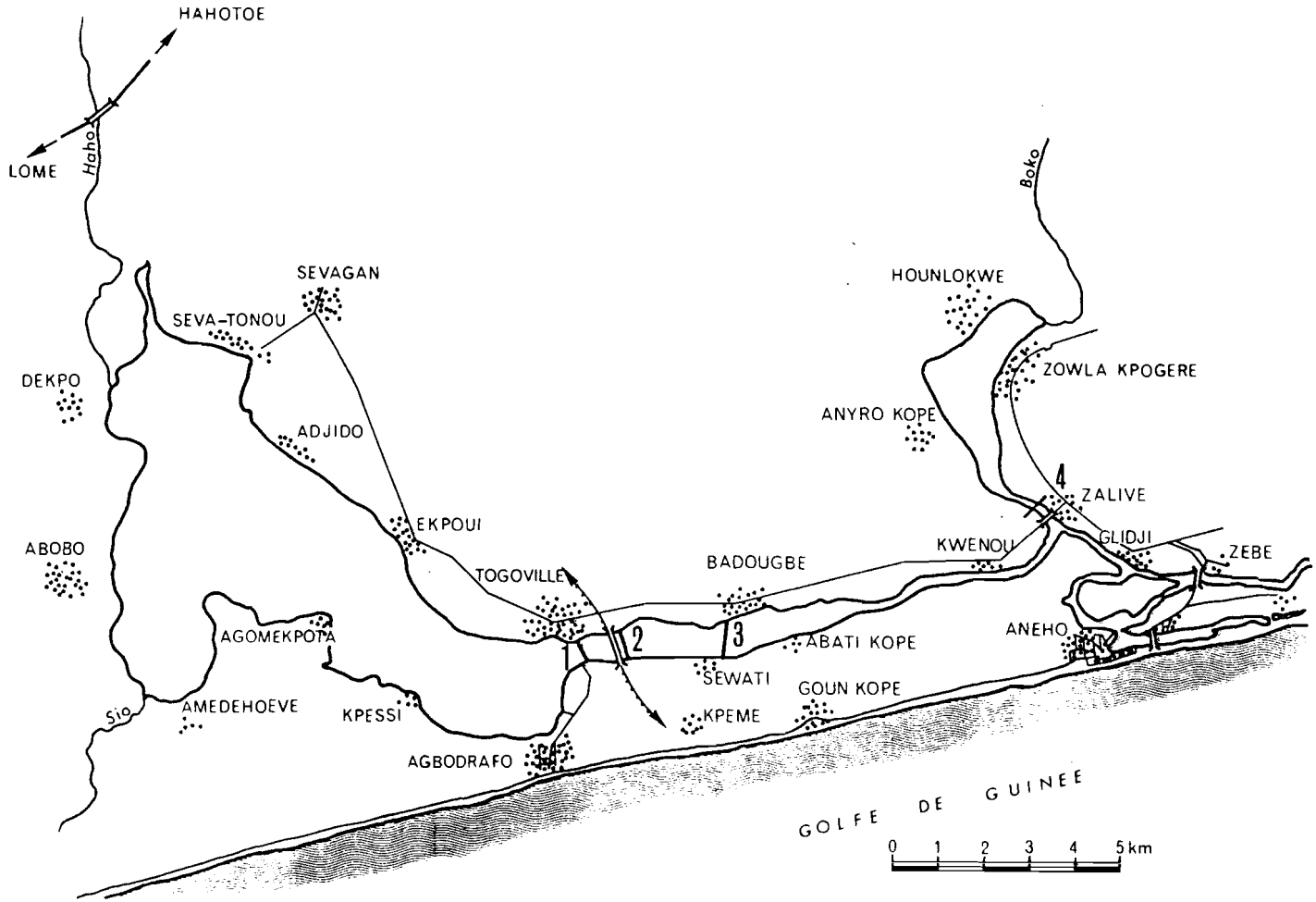


Fig-15 Etude du système lagunaire du TOGO
Situation des profils en travers effectués sur les chenaux lagunaires

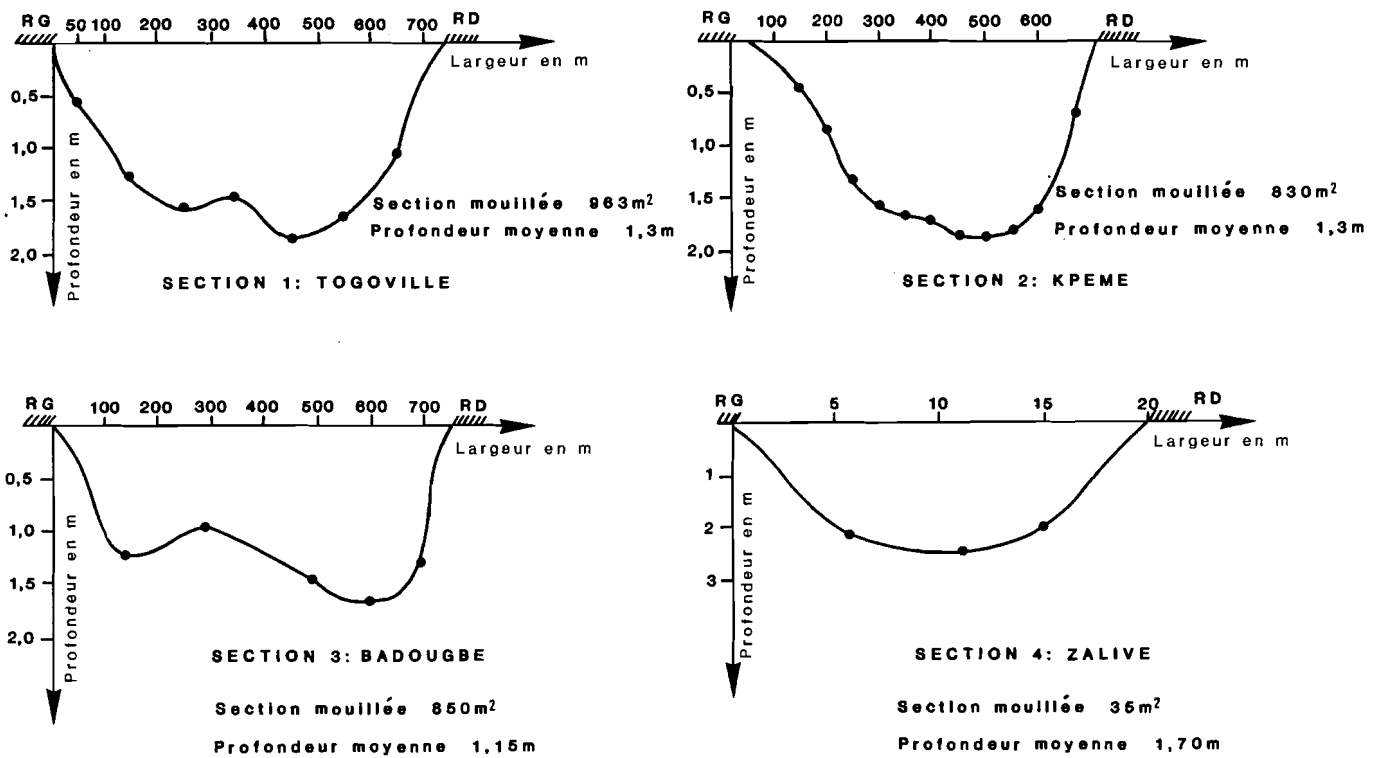


Fig-16 LAGUNE DE TOGOVILLE PROFILS EN TRAVERS

Ces profils ont été établis le 10-3-81, la cote de la surface de l'eau étant de 0,547 m IGN à l'échelle de Kpémé.

On remarquera la présence d'une sorte de "chenal", plus profond qui longe la rive sud de la lagune jusqu'au niveau de Bati Kopé. Au-delà, le fond de la lagune remonte très brutalement jusqu'à Zalivé.

3.3.2 Variations saisonnières des cotes du plan d'eau

La Fig. 17 présente les variations saisonnières du plan d'eau de la lagune au niveau du pont de Zébé, en cote IGN et en moyenne décadaire.

Une comparaison pourra être faite avec les variations maxima et minima, observées respectivement en 1961 et 1968, depuis la création de la station, en février 1960.

On constate que les variations du plan d'eau à Zébé à l'extrémité est du système lagunaire, évoluent de façon parfaitement synchrone avec celles du plan d'eau du Lac Togo. Les marnages maxima observés au cours des années 1981 et 1982 ont été respectivement de 1,37 m et de 1,59 m, ce qui coïncide avec les valeurs des marnages observés à la même époque sur le Lac.

3.3.3 Les variations saisonnières des pentes de ligne d'eau

a - de Togoville à Zébé

Nous avons calculé les valeurs de la pente de ligne d'eau dans la partie sud du système; depuis la station de Kpémé située à l'exutoire du Lac jusqu'à la station de Zébé à l'extrémité est de la lagune d'Aneho. La distance entre ces deux stations est de 13 350 m. Nous présentons la valeur de la pente en moyenne annuelle, ainsi que les deux moyennes mensuelles extrêmes, pour les deux années de marnage minimum et maximum, respectivement 1961 et 1968.

ANNEE	MOYENNE ANNUELLE	MOYENNE MENSUELLE MINIMALE	MOYENNE MENSUELLE MAXIMALE
1961	$2,5 \cdot 10^{-5}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$ (JAN)	$3,2 \cdot 10^{-5}$ (NOV)
1968	$3,7 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$ (MARS)	$6,9 \cdot 10^{-5}$ (OCT)

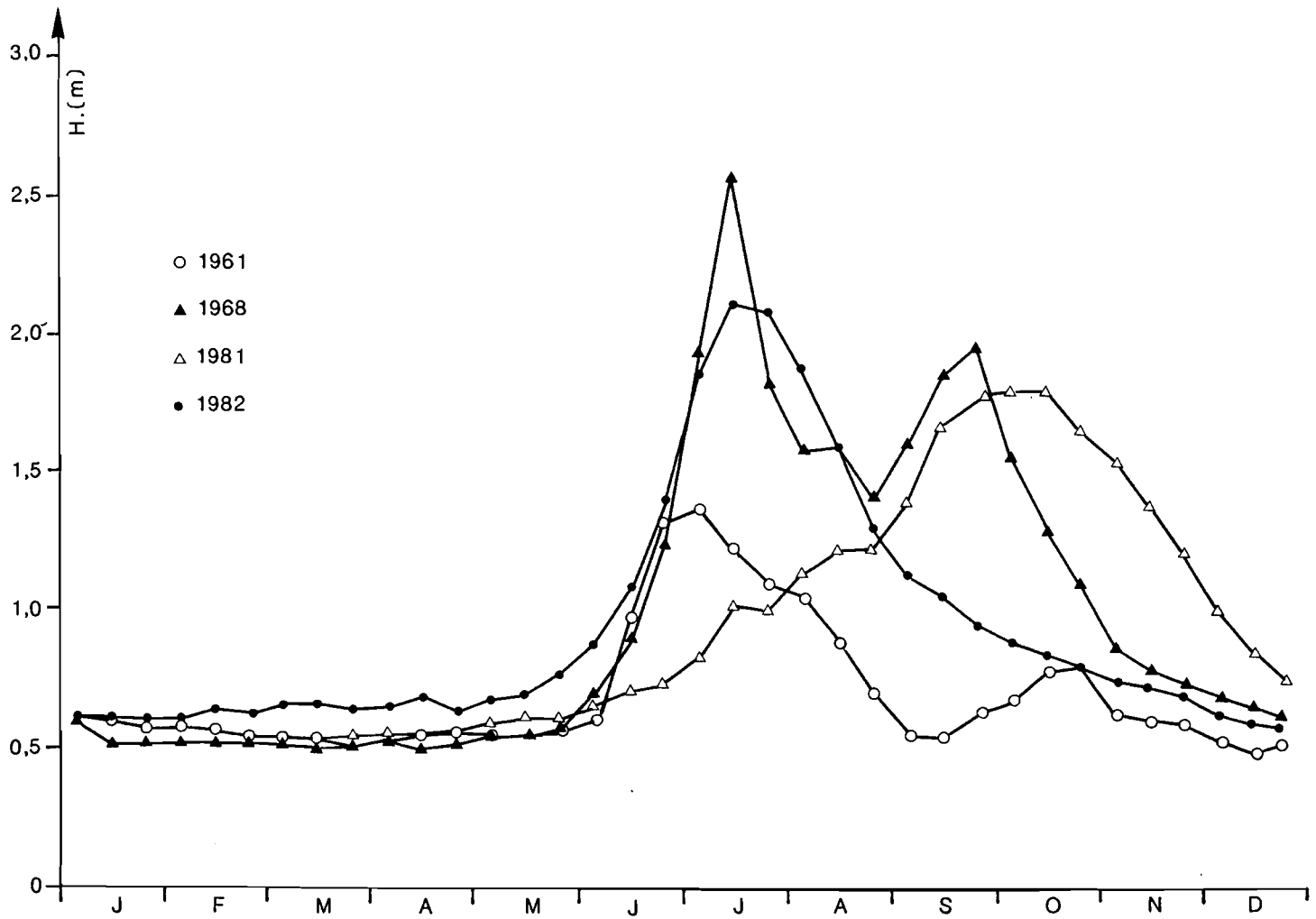


Fig-17

VARIATIONS DU PLAN D'EAU DE LA LAGUNE STATION DE ZEBE-COTES I.G.N- MOYENNES DECADAIRES

Ces valeurs très faibles de la pente de ligne d'eau sont exactement du même ordre de grandeur que celles observées entre les rives nord et sud du Lac Togo proprement dit.

b - sur la lagune d'Aneho

Les enregistrements des variations du niveau de l'eau dans les chenaux lagunaires de la région d'Aneho, à partir des quatre limnigraphes de Zalivé, de Zébé, de Sanvi Kondji et d'Aneho, depuis le mois de mai 1981, ont permis de suivre l'évolution saisonnière des pentes de ligne d'eau entre chacune de ces stations, grâce au rattachement de ces stations au Nivellement Général IGN. Les tableaux 7 à 11 présentent respectivement pour les années d'observation 1981 et 1982, les valeurs des pentes en moyenne mensuelle, ainsi que la proportion des résultats significatifs à partir desquels ont été calculées les moyennes, par rapport à l'ensemble des résultats obtenus pour le mois considéré.

En effet nous avons dans un premier temps calculé toutes les valeurs de pente de ligne d'eau entre deux stations préalablement choisies, de douze heures en douze heures, sur toute la période intéressante d'observation : à savoir, de mai à décembre en 1981, et de mai à septembre en 1982. Dans un second temps, nous avons éliminé toutes les valeurs de pente issues d'une différence de cote aux stations considérées, inférieure ou égale à 2 cm. Nous présentons les moyennes mensuelles calculées sur les résultats ainsi sélectionnés et on distinguera les résultats des pentes "positives" ou "négatives", obtenus pour chaque couple de stations. Une pente positive calculée d'une station A vers une station B, correspondant à un écoulement potentiel de A vers B.

ANNEE 1981

PENTE DE ZEBE VERS ANEHO Distance : 2000 m							
DATE		J	J	A	O	N	D
PROPORTION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS %	Pente "positive" :	40	43	11	43	3	11
	Pente "négative" :	11	3	0	5	15	0
MOYENNES MENSUELLES ($x\ 10^{-6}$)	Pente "positive" :	11,7	10,3	10,2	14	8,3	8,3
	Pente "négative" :	11,6	8,3	-	11,6	9	-

Tableau 7 : Valeurs mensuelles des pentes de ligne d'eau entre les stations de Zébé et Aneho, en 1981.

Commentaires : On constate un écoulement potentiel dominant vers Aneho. Les valeurs des pentes positives ou négatives sont sensiblement identiques au cours de la période d'observation et la valeur moyenne annuelle de la pente entre ces stations est de $10,1 \cdot 10^{-6}$ avec un écart type de $1,8 \cdot 10^{-6}$ qui correspond à une différence de cote de 5mm, ce qui est très significatif.

ANNEE 1981

PENTE DE ZEBE VERS ZALIVE Distance : 4000 m									
DATE		M	J	J	A	S	O	N	D
PROPORTIION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS %	Pente "positive"	100	100	71	100	100	100	100	80
	Pente "négative"	0	0	0	0	0	0	0	0
MOYENNES MENSUELLES ($\times 10^{-6}$)	Pente "positive"	15	12,3	12,8	11,1	12,8	8,8	8,5	7,5
	Pente "négative"	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau 8 : Valeurs mensuelles des pentes de ligne d'eau entre Zébé et Zalivé, en 1981.

Commentaires : L'écoulement potentiel est exclusivement dirigé vers Zalivé. Les valeurs des pentes accusent une régression progressive au cours de la période d'étude.

La pente moyenne de juin à septembre est de $12,2 \cdot 10^{-6}$, et la valeur moyenne d'octobre à décembre est de $8,2 \cdot 10^{-6}$, avec un écart type de $0,8 \cdot 10^{-6}$, qui correspond à une différence de cote de 3 mm, ce qui est tout à fait comparable aux résultats trouvés entre les stations de Zébé et d'Aneho.

ANNEE 1981

PENTE DE ZEBE VERS SANVI KONDJI Distance : 1500 m								
DATE		J	J	A	S	O	N	D
PROPORTION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS %	Pente "positive"	3	0	0	0	0	0	0
	Pente "négative"	80	58	100	48	53	21	100
MOYENNES MENSUELLES ($\times 10^{-6}$)	Pente "positive"	24,3	-	-	-	-	-	-
	Pente "négative"	16,7	16,7	19,1	16,6	13,9	13,1	38,4

Tableau 9 : Valeurs mensuelles des pentes de ligne d'eau entre Zébé et Sanvi Kondji, en 1981.

Commentaires : L'écoulement potentiel est exclusivement dirigé vers Zébé à quelques exceptions près au mois de juin.
La pente moyenne (négative) de juin à novembre est de 16 $.10^{-6}$, avec un écart type de 2,2 $.10^{-6}$ qui correspond à une différence de cote de 3 mm.

ANNEE 1982

PENTE DE ZEBE VERS ZALIVE Distance : 4000 m						
DATE		M	J	J	A	S
PROPORTION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS %	Pente "positive"	0	0	46	40	100
	Pente "négative"	98	100	0	13	0
MOYENNES MENSUELLES (x 10^{-6})	Pente "positive"	-	-	6,2	7,8	11,5
	Pente "négative"	13,2 (41,4)	65,8 (184)	-	8,0	-

Tableau 10 : Valeurs mensuelles des pentes de ligne d'eau entre Zébé et Zalivé en 1982.

Commentaires : L'écoulement potentiel est dirigé vers Zébé en mai et en juin - et dirigé vers Zalivé (et le Lac Togo) à partir de juillet, avec une très forte réduction de pente.
Les valeurs moyennes sont très variables pour les mois de mai et juin. La valeur entre parenthèse correspond à la moyenne calculée à partir des valeurs de la dernière semaine du mois considéré, l'autre valeur étant calculée sur les trois premières semaines du même mois. La valeur de la pente fin juin 82 est le maximum observé sur la lagune d'Aneho au cours de la période d'étude.

ANNEE 1982

PENTE DE ZEBE VERS SANVI KONDJI Distance : 1500 m						
DATE		M	J	J	A	S
PROPORTION DE RESULTATS SIGNIFICATIFS %	Pente "positive"	0	0	0	0	0
	Pente "négative"	100	100	100	100	100
MOYENNES MENSUELLES (x 10^{-6})	Pente "positive"	-	-	-	-	-
	Pente "négative"	79,5	83,5	36,8	53,5	55,8

Tableau 11 : Valeurs mensuelles des pentes de ligne d'eau entre Zébé et Sanvi Kondji, en 1982.

Commentaires : L'écoulement potentiel reste exclusivement dirigé vers Zébé. La pente moyenne est de $81,5 \cdot 10^{-6}$ en mai et juin, régresse en juillet à $36,8 \cdot 10^{-6}$, puis remonte à $54,6 \cdot 10^{-6}$ en août et septembre.

Si l'on cherche à résumer les tendances aux écoulement potentiels dans la lagune d'Aneho, il ressort de ces résultats les trois principaux points suivants :

a - l'inversion très fréquente de l'orientation de la pente entre les stations de Zébé et d'Aneho (1981) qui pourrait indiquer l'absence d'écoulement potentiel bien défini entre ces deux stations en période de fermeture du cordon lagunaire sur la mer.

b - la tendance à un écoulement potentiel régulier des eaux du Gbaga en provenance du bas-Mono, dans la lagune d'Aneho et voire même au-delà de Zébé vers la lagune de Vogan et le Lac Togo - (Un tel écoulement vers la lagune de Vogan a d'ailleurs été observé in situ en octobre 1981 -).

Il semble peu probable que cette tendance ait été effective tout au long des saisons de crue en 1981 et en 1982.

c - la forte augmentation de la pente dirigée de Zalivé vers Zébé, au cours des mois de mai et juin 1982, et qui pourrait coïncider avec l'amorce de l'écoulement de vidange du Lac (cf. § 3.2.4). Mais l'inversion de cette tendance dès le mois de juillet, alors que l'écoulement de vidange du Lac s'accentue, vient en contradiction avec cette hypothèse.

En définitive, il semble que la précision à accorder à cette étude de pente soit faible. En effet, devant des valeurs aussi petites des pentes de ligne d'eau, nous atteignons les limites de la sensibilité de la collecte des hauteurs d'eau, qui ont été enregistrées sur limnigrammes avec une réduction au 1/10è, ce qui paraît a posteriori nettement insuffisant et inadapté. Toute étude ultérieure éventuelle devra utiliser au minimum des réductions au 1/5è. C'est ainsi que notre sélection des valeurs de pente, qui tend à respecter logiquement une différence de cote entre deux stations, supérieure à 2 cm, peut probablement conduire à une perte importante d'information, en raison de la trop faible sensibilité des enregistrements.

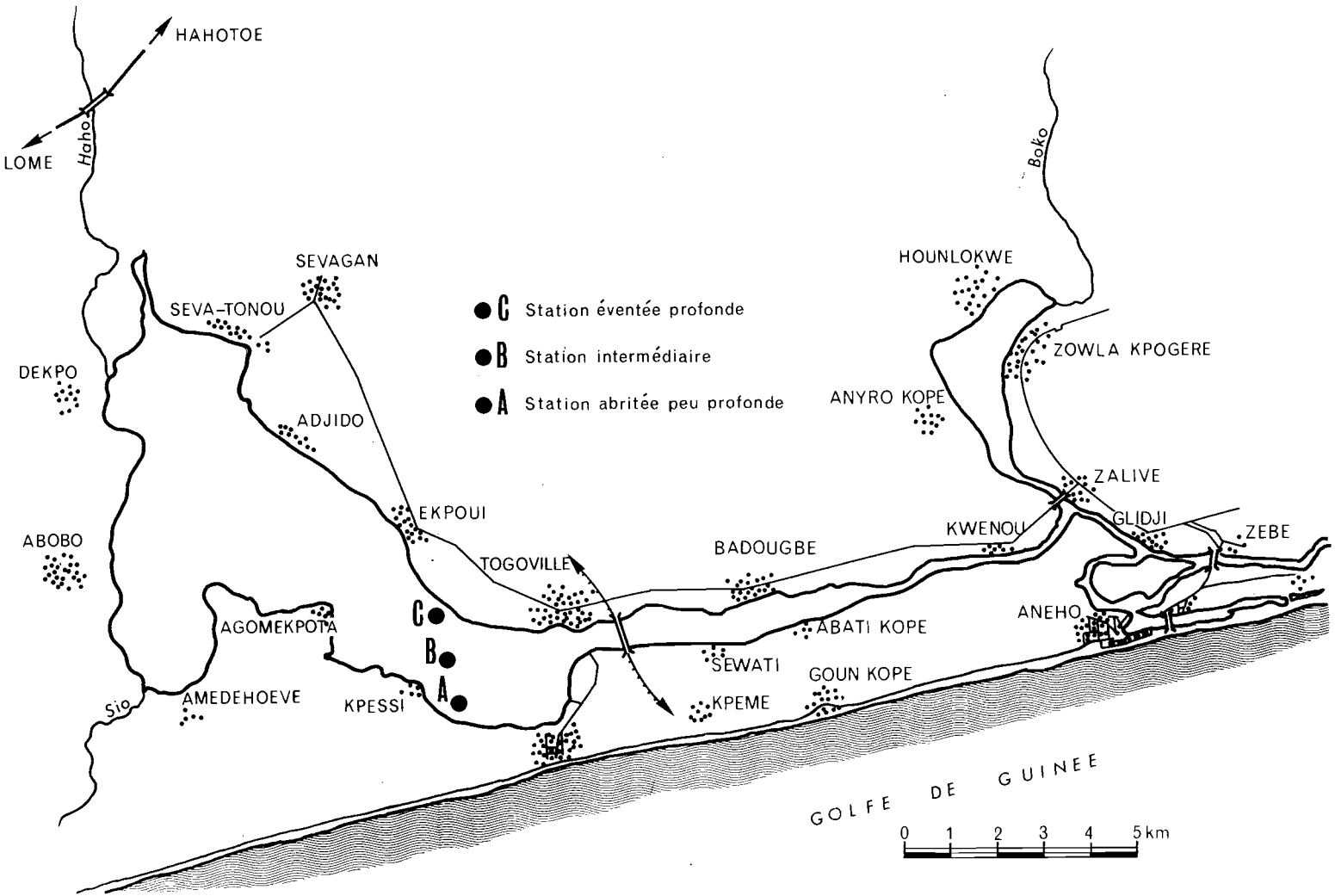


Fig-18 LAC TOGO Situation des points de contrôle des variations journalières de température et O_2

CHAPITRE IV

QUALITE DES EAUX DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS

1 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES PHYSICO-CHIMIQUES DES EAUX

1.1 Température

Les mesures régulières de la température des eaux du Lac Togo ont montré d'une part une grande homogénéité spatiale sur l'ensemble du plan d'eau, une variation saisonnière assez importante, ainsi qu'une légère évolution journalière sur l'épaisseur de la tranche d'eau et dont nous envisagerons tout d'abord l'étude, à partir de l'observation en continue de trois stations présentant des caractéristiques différentes, à deux époques distinctes de l'année 1981. Ensuite, nous présenterons les valeurs moyennes mensuelles des températures de la surface du Lac au cours des deux années d'observation.

1.1.1 Les variations journalières de la température

La Fig. 18 présente le plan de situation des trois stations choisies pour l'observation en continue de la température. La station A se situe en zone abritée et peu profonde, la station B en zone plus turbulente et la station C, à l'endroit le plus éventé, le plus turbulent et le plus profond du Lac.

Les Fig. 19 et 20 présentent respectivement les diagrammes d'évolution journalière des températures à ces trois stations au cours de la journée du 22-4-81 en période d'étiage minimal et aux deux stations extrêmes A et C, au cours de la journée du 10-7-81 en période de crue.

L'observation de ces diagrammes fait apparaître trois types principaux d'influence.

a - L'effet d'ensoleillement et de l'inertie thermique des couches profondes qui apparaît dans la différence entre les amplitudes verticales du matin et du soir, ainsi que dans la forme de la répartition verticale de la température en fonction de la profondeur sur chacun des diagrammes.

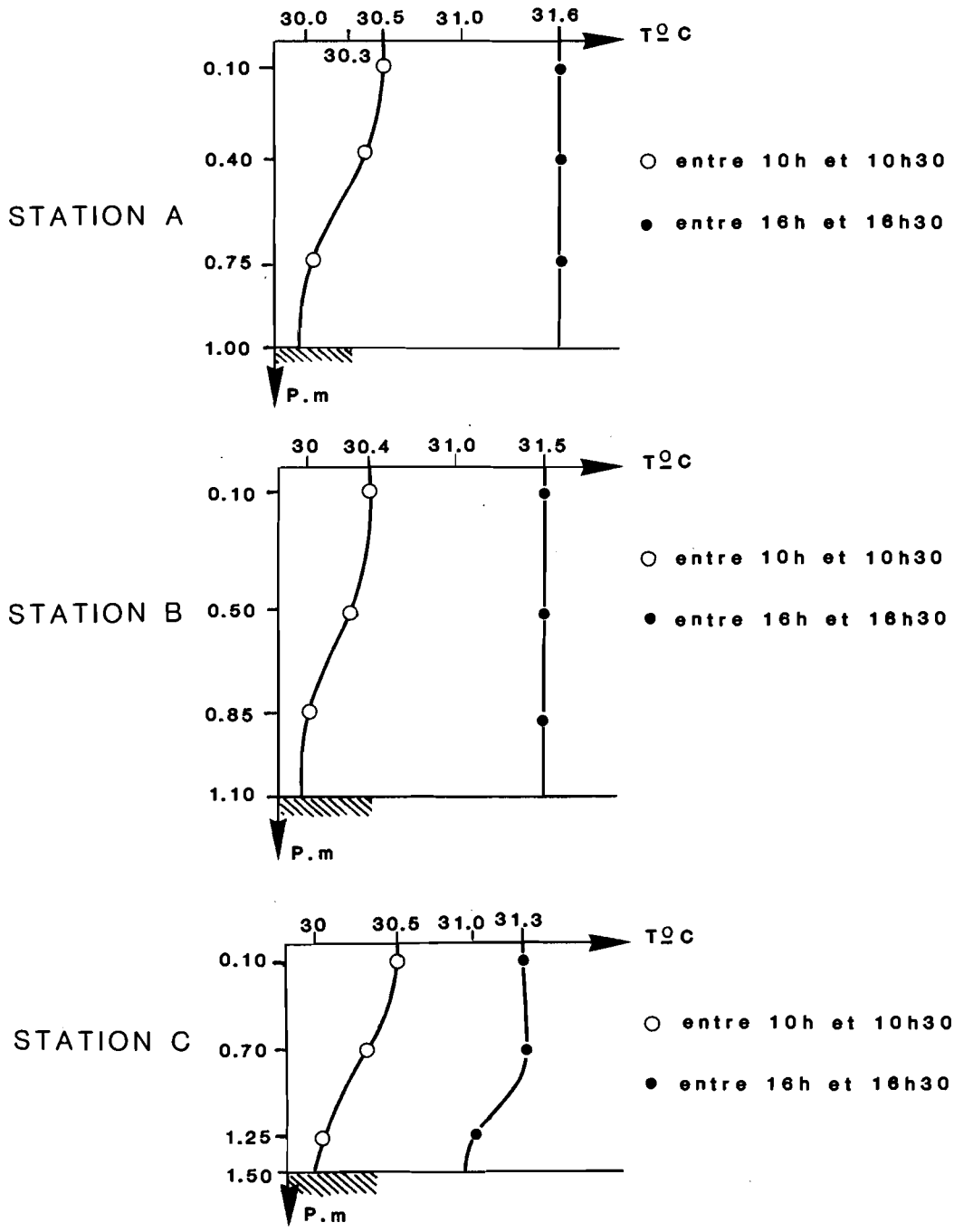


Fig-19 VARIATIONS JOURNALIERES DE LA TEMPERATURE DES EAUX DU LAC TOGO EN PERIODE D'ETIAGE LE 22-04-1981

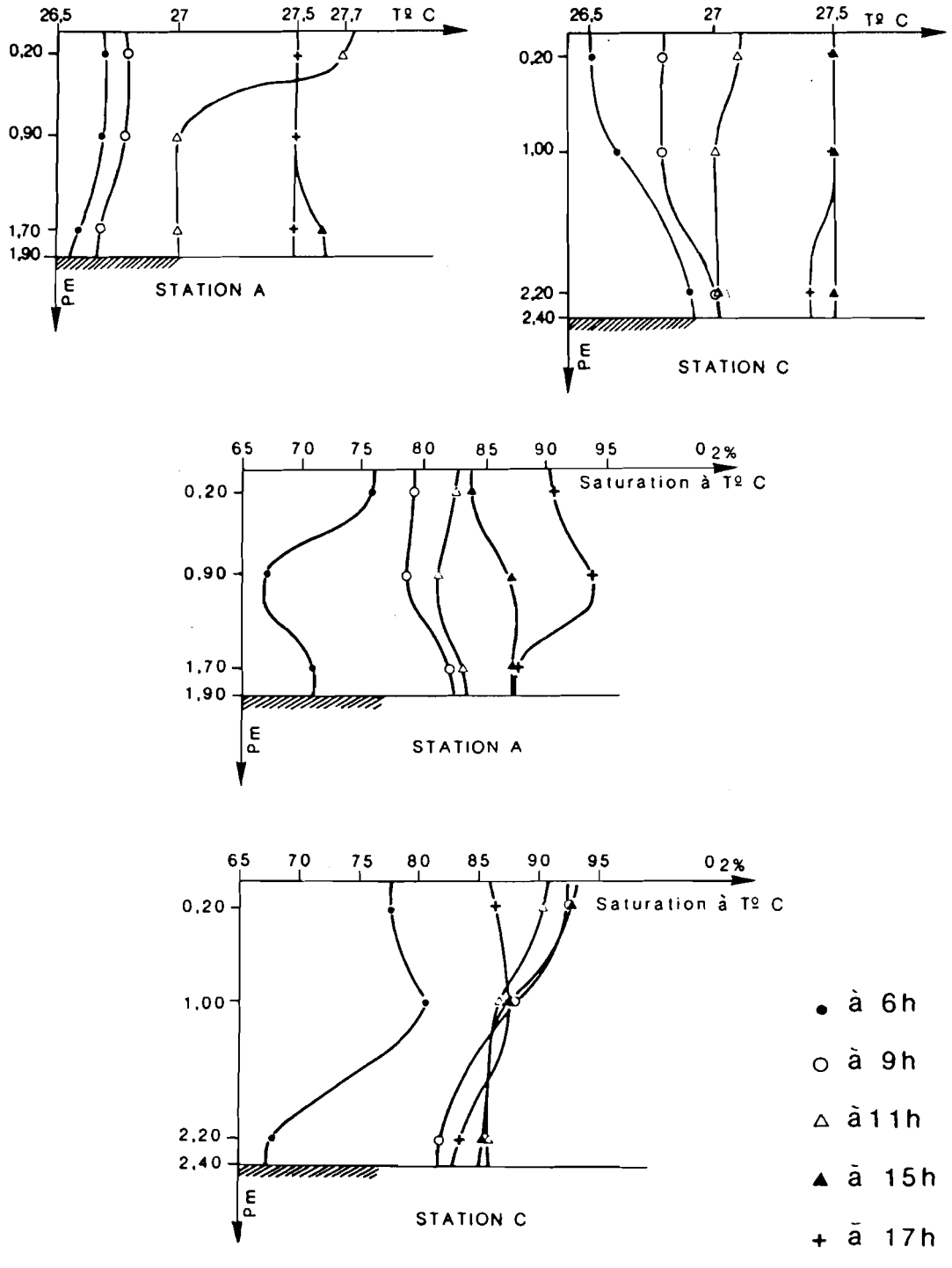


Fig-20 VARIATIONS JOURNALIERES DE LA TEMPERATURE ET DE L'OXYGENE DISSOUS DES EAUX DU LAC TOGO EN PERIODE DE CRUE LE 10-07-1981

b - L'effet de profondeur qui semble également influencer le maintien d'un écart vertical de température de 0,3°C à la station C toute la journée, par perte de l'action solaire directe et l'atténuation des turbulences en profondeur.

c - L'effet de turbulence (d'origine mécanique), qui réduit jusqu'à parfois l'annuler, l'écart vertical de température. Il semble que l'agitation de surface soit également responsable de la relativement faible valeur de l'amplitude journalière maximale à la surface de la station C.

Le suivi de la température de la surface du Lac, à proximité de la rive au niveau d'Agbodrafo, à raison de trois relevés quotidiens a permis de montrer qu'une moyenne journalière de ces relevés était représentative (à 0,1°C près) de la valeur moyenne de la température de surface du Lac.

L'amplitude journalière diurne de la température des eaux du Lac en surface présente un maximum de 9° C le 24-2-83 et un minimum de 0,5° C le 14-6-82 devant la station d'Agbodrafo.

1.1.2 Les variations saisonnières de la température

Le tableau 12 présente l'ensemble des valeurs moyennes mensuelles de la température de la surface du Lac Togo, de février 1981 à décembre 1983.

1981

DATE	-	F	-	A	-	J	J	A	S	O	N	D
T °C	-	29,9	-	30,8	-	29,0	25,8	26,9	28,5	29,6	29,9	30,0

1982

DATE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T °C	28,1	29,4	30,5	29,8	28,2	25,0	24,6	26,2	28,0	27,8	28,3	28,9

1983

DATE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
T °C	27,2	29,9	29,7	30,4	29,6	27,6	28,2	27,7	27,7	28,7	29,1	28,3

Tableau 12 : Evolution saisonnière des valeurs moyennes mensuelles de la température des eaux de surface du Lac Togo.

Il ressort de ces valeurs, la grande variabilité interannuelle des valeurs de la température du Lac Togo, qui semblent soumises étroitement aux variations des conditions climatiques et hydrologiques du milieu. Les températures des eaux sont toujours plus faibles en 1982 qu'en 1981, comme le sont également les valeurs de la température de l'air et de la durée d'ensoleillement. La baisse brutale de la température des eaux du Lac en juillet 81 et en juin-juillet 82 semblerait liée aux régimes des précipitations (cf. ch. III, § 2.1). Les températures élevées de juillet et août 1983 sont liées à un déficit des précipitations.

Les mesures effectuées sur les bras des lagunes de Togoville et d'Aneho à l'est du système sont identiques à celles effectuées sur le Lac aux mêmes époques.

Les moyennes mensuelles extrêmes observées à la surface des eaux sont de 30,8°C en avril 1981 en pleine saison d'étiage minimum et de 24,6°C en juillet 1982 en pleine saison de crue, valeurs compatibles, quoique plus faibles avec les valeurs extrêmes des températures en moyenne mensuelle interannuelle, déterminées par VARLET (1978) sur la période 1938-1945 sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire : 31,2°C en avril et 27,4°C en août.

Les valeurs extrêmes relevées à la surface du Lac Togo à proximité de la rive sud, ont été de 23°C à 6 heures (à 9 reprises entre le 6 juin et le 26 juillet 1982), et de 34,8°C le 17 mars 1982 à 12 heures. La gamme de variation de la température des eaux du Lac Togo paraît plus large que sur les milieux lagunaires voisins d'après les mesures relevées sur le Lac Nokoué au Bénin : 25,5°C et 32,2°C (TEXIER et al., 1980) et sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire : 25,5°C et 34°C (PAGES et al., 1979 ; TASTET, 1975) , cette légère différence, surtout sensible pour les températures les plus faibles, pouvant être imputable à un refroidissement temporaire sous l'effet des eaux de crue, accentué par le faible volume du Lac et un faible brassage des eaux.

1.1.3 Les variations spatiales de la température

La répartition spatiale de la température des eaux sur l'ensemble du plan d'eau lagunaire a toujours montré une très grande homogénéité et une évolution synchrone sous l'effet des contraintes climatiques essentiellement, ou des crues. Ces observations coïncident avec celles effectuées sur le Lac Nokoué au Bénin et même en lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, où l'écart spatial de température dans les zones non soumise à une influence des marées, ne dépasse pas 3°C (DURAND et CHANTRAINE, 1982).

Une grande homogénéité thermique verticale à également été remarquée quelle que soit la saison et l'écart des températures de surface et de fond ne dépasse jamais 1,5°C, ce qui coïncide avec les observations effectuées sur le Lac Nokoué au Bénin : écart maximal observé 1,5°C ; écart égal à 0,2°C dans 42 % des cas observés, écart nul dans 54 % des cas observés (TEXIER et al., 1980). D'une façon générale, ce milieu revêt un caractère oligomictique marqué, caractéristique des plans d'eau lagunaires de faible profondeur, sous de telles latitudes et privés de toute influence marine, ce qui n'est pas le cas, par exemple, de la lagune Ebrié au niveau d'Abidjan.

La température n'apparaît donc pas comme un paramètre sensible de traçage de la circulation des eaux, sur les lagunes togolaises, en période de fermeture du système sur la mer ; il peut être toutefois réservé au suivi de la propagation des eaux marines en période d'ouverture du cordon littoral.

1.2 pH

Les valeurs du pH des eaux lagunaires ne présentent que de très légères variations saisonnières, liées principalement au régime hydrologique de la lagune et le tableau 13 présente les valeurs moyennes du pH observé au cours de la période d'étude, dans les différentes zones lagunaires.

1981

DATE	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
LAC TOGO	8,24	-	8,0	8,0	6,96	7,68	-	7,54	7,68	-	7,56
LAGUNE TOGOVILLE	-	8,0	-	7,83	7,25	7,8	-	-	-	-	-
LAGUNE ANEHO	7,9	-	7,9	7,9	6,8	7,8	-	-	7,6	-	7,36
LAC DEVANT EMBOUCHURE DU SIO	8,3	-	8,1	8,13	6,9	7,3	-	7,6	6,85	-	7,07
SIO A DJAGBLE	-	-	-	-	-	-	-	-	6,85	-	-
HAHO à HAHOTOE	-	-	-	-	-	7,6	-	-	7,55	-	-

1982

DATE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
LAG TOGO	7,81	8,06	7,81	7,64	8,04	7,45	-	7,51	-	8,07	7,75	8,15
LAGUNE TOGOVILLE	8,21	7,82	8,14	7,35	7,87	7,62	-	7,46	-	8,2	7,8	8,0
LAGUNE ANEHO	8,0	7,6	7,74	7,41	7,5	7,17	-	7,3	7,8	7,7	7,6	7,85
LAC DEVANT EMBOUCHURE DU SIO	7,7	7,8	7,8	7,6	8,13	6,75	-	7,55	-	8,05	7,5	8,15
SIO A DJAGBLE	6,5	6,4	7,5	7,9	7,15	7,05	-	7,5	-	6,75	7,0	6,5
HAHO à HAHOTOE	6,95	7,3	7,0	7,3	7,7	7,0	-	7,65	-	7,4	7,32	6,9

Tableau 13 : Evolution des valeurs moyennes mensuelles du pH des eaux des lagunes, du Lac Togo et de ses tributaires.

L'évolution spatio temporelle des valeurs du pH des eaux lagunaires appelle quatre remarques principales :

a - L'acidification très nette des eaux lagunaires sur l'ensemble des plans d'eau au début de la saison humide, sous l'effet de l'arrivée des premières eaux continentales en mai et juin, phénomène tout à fait comparable (mais d'un ordre de grandeur plus élevé) aux observations effectuées sur le Lac Nokoué au Bénin : chute brutale du pH de 0,4 unité en moyenne dès les premières pluies de mai (TEXIER et al., 1980). Les valeurs très faibles du pH observées devant l'embouchure du Sio marquent l'influence dans cette région des eaux plus acides de ce tributaire à l'arrivée des premières crues. Ce phénomène, localisé dans l'espace et dans le temps, mais provoquant chaque année une mortalité chez certaines espèces de poissons, s'expliquerait par l'arrivée en début de crue des eaux de drainage de la plaine aval du Sio, très marécageuse, riche en matières organiques et susceptibles d'être chargées en acides organiques ; la couleur nettement rougeâtre de ces eaux ainsi que leur forte odeur d'humus tendraient à confirmer cette hypothèse (pH = 6,9 en juin 1981 ; pH = 6,75 en juin 1982).

D'une façon générale, les eaux du Sio apparaissent toute l'année plus acide que les eaux du Haho.

b - L'impact des eaux marines, plus alcalines que les eaux continentales, qui apparaît nettement en comparant les valeurs moyennes du pH des eaux du Lac Togo au cours des étiages 1981 consécutif à l'ouverture du système sur la mer, et 1982, consécutif à sa fermeture prolongée : pH = 8,24 en février 1981 ; pH = 7,81 en février 1982. Ce même phénomène lié à l'intrusion d'eau marine apparaît également en comparant les valeurs du pH du Lac Togo et de la lagune de Togoville par rapport à celle observée devant l'embouchure du Sio au début de l'étiage 1982. La valeur maximale pH = 8,24 relevée au cours de l'étiage 1981 est tout à fait compatible avec les observations effectuées sur le Lac Nokoué au Bénin : pH maximum de 8,1 en octobre 1979 (TEXIER et al., 1980).

Toutefois, le système lagunaire togolais n'a pas été observé au cours d'une période d'échange direct avec la mer et par conséquent aucune corrélation du pH avec la salinité des eaux ne peut être faite, comme le cas fut observé sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, dans la baie de Cocody soumise aux marées (DAGET et DURAND, 1968).

c - Le développement d'une acidité tout à fait particulière dans la lagune d'Aneho, avec des écarts de 0,2 à 0,5 unité pH, par rapport aux valeurs moyennes du Lac Togo et surtout sensible au cours de l'année 1982 de fermeture

du cordon littoral. Ce phénomène, surtout localisé au niveau du diverticule situé au contact immédiat du cordon lagunaire fermé, à côté de la ville d'Aneho, pourrait être lié à une distrophie locale, favorisée par la proximité de la ville et un état de confinement général en période de fermeture du cordon sur la mer (un dégagement d'hydrogène sulfuré a d'ailleurs été fréquemment observé au même endroit, en profondeur - 8 à 10 mètres - au cours de l'année 1982). Cette brusque acidification des eaux sous l'effet d'un enrichissement organique et d'un mauvais brassage, n'est pas rare en milieu lagunaire et a été observé également sur le Lac Nokoué au Bénin à proximité des villages lacustres : pH = 6,7 en mai 1979 à Ganvié (TEXIER et al., 1980) ; ainsi que sur la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, où des valeurs de pH de 5,47 sont observées en face de l'Agneby alors que les valeurs sont de 8,5, 20 kilomètre plus à l'ouest, en février 1952 (VARLET, 1978).

d - Une très légère amplitude journalière de l'ordre de 0,1 unité pH, remarquée surtout au cours de l'étude en continu du 10 juillet 1981 et qui se manifeste par une augmentation du pH de façon homogène et synchrone sur toute l'épaisseur de la tranche d'eau. Une influence de l'activité photosynthétique des organismes planctoniques autotrophes n'est pas à exclure pour interpréter ce petit phénomène, qui est loin d'atteindre l'ampleur observée sur la lagune Ebrié, dans la baie abritée de Koumassi-est le 26 avril 1951 : pH = 7,6 à 8 heures et pH = 8,24 à 18 heures (VARLET, 1978).

D'une façon générale, il semble que les variations spatiales et saisonnières du pH des eaux des lagunes togolaises soient assez marquées et plus nettement que sur le Lac Nokoué beaucoup plus étendu. La distinction entre des influences continentales ou marines, ainsi qu'entre milieu libre ou confiné paraît déjà pouvoir être faite mais serait beaucoup plus précise en période d'échange direct avec la mer.

1.3 Oxygène dissous

La Fig. 20 présente également les variations journalières de la teneur en oxygène dissous aux deux stations caractéristiques A et C précédemment décrites (cf. § 1.1) et localisées sur la Fig. 18, exprimées en pourcentage de saturation à la température mesurée de l'eau et à pression atmosphérique normale.

L'évolution est marquée par une augmentation progressive de la teneur en O_2 dissous sur l'ensemble de la tranche d'eau, sous l'effet du brassage mécanique des eaux, très influent en ces milieux de faible profondeur et de l'activité in situ photosynthétique des organismes phytoplanctoniques.

Les teneurs observées au cours de la journée du 10-7-81 à la station A, en milieu calme et peu profond, ont varié de 76 à 91 % de saturation en surface et de 70 à 87 % de saturation en profondeur ; à la station C, en milieu plus agité, de 78 à 93 % de saturation en surface et de 68 à 87 % de saturation en profondeur. Ces valeurs sont de même ordre de grandeur que celles relevées dans les cinq premiers mètres de la zone estuarienne de la lagune Ebrié en Côte d'Ivoire, en période de crue (DUFOUR et SLEPOUKHA, 1975 in : DURAND et SKUBICH, 1982). En période d'étiage, on pourrait s'attendre d'après ces auteurs à une augmentation des teneurs en surface pouvant dépasser 100 % de saturation sous l'effet d'un brassage des eaux de surface favorisé par une légère stratification thermohaline des eaux.

D'autre part, l'effet de l'activité photosynthétique peut être beaucoup plus important et en plein étiage (26 avril 1951) en lagune Ebrié, dans la baie abritée de Koumassi est, VARLET (1978) relève des teneurs de 70 % de saturation en surface à 8 heures qui passent à plus de 125 % à 16 heures, parallèlement à une très forte hausse du pH (cf. § 1.2).

1.4 Transparence des eaux

1.4.1 Variations saisonnières et spatiales

Le tableau 14 présente les valeurs saisonnières de la transparence moyenne des eaux, pour chacune des 6 zones définies sur le Lac Togo et la lagune de Togoville (cf. Fig. 6), mesurée au disque de SECCHI de 30 cm de diamètre et exprimée en mètre dans chaque ligne a, et en % de transmission de la lumière par mètre, dans la ligne b, calculée d'après la formule suivante :

$$T\ (\%) = 100\ e^{-n} \text{ avec } n = \frac{2{,}06}{Z^{1{,}04}}$$

Z = hauteur de transparence en mètre (d'après JONES et WILL, 1956).

DATES / ZONES		1981 26 mai	25 juin	24 juil	08 sept	14 oct	01 déc	1982 26 janv	29 avr	30 juin	03 aout	04 sept	18 oct	09 nov	31 déc	
1	a	0,75	1,05	0,3	0,55	0,3	0,4	0,2	0,75 tot.	0,25	0,35	0,3	0,25	0,35	0,50	m
	b	6,21	14,1	0,07	2,15	0,07	0,48	0,002	6,21	0,02	0,21	0,07	0,02	0,21	1,45	%
2	a	0,9	1,05	0,75	-	0,35	0,4	0,25	0,9 tot.	0,5	0,4	0,4	0,3	0,45	0,5	m
	b	10,04	14,1	6,21	-	0,21	0,48	0,02	10,04	1,45	0,48	0,48	0,07	0,88	1,45	%
3	a	1,15	1,15	0,9	0,45	0,35	0,25	0,3	1,0 tot.	0,45	0,5	0,3	0,4	0,45	0,6	m
	b	16,84	16,84	10,04	0,88	0,21	0,02	0,07	12,74	0,88	1,45	0,07	0,48	0,88	3	%
4	a	1,1	1,1	1,25	0,6	0,35	0,3	0,25	1,15 tot.	0,7	0,5	0,45	0,4	0,45	0,7	m
	b	15,48	15,48	19,53	3	0,21	0,07	0,02	16,84	5,05	1,45	0,88	0,48	0,88	5,05	%
5	a	1,25	1,0	1,35	1,05	0,4	0,3	0,25	1,1 tot.	0,95	0,4	0,3	0,55	0,55	1,05	m
	b	19,53	12,74	22,14	14,1	0,48	0,07	0,02	15,48	11,38	0,48	0,07	2,15	2,15	14,1	%
6	a	1,3 tot.	1,0	1,5	1,15	-	-	0,6	1,2 tot.	1,2	0,45	0,35	0,7	1,2	1,15	m
	b	20,84	12,74	25,9	16,84	-	-	3	18,19	18,19	0,88	0,21	5,05	18,19	16,84	%

Tableau 14 : Variations saisonnières et régionales des valeurs moyennes de la transparence des eaux du Lac Togo (zones 1 à 5), et de la lagune de Togoville (zone 6), exprimée en mètre (ligne a), et en pourcentage de transmission de la lumière par mètre (ligne b).

On constate que la turbidité des eaux évolue selon le rythme du régime hydrologique du Lac.

La turbidité augmente avec l'arrivée des crues, et l'on constate une nette variation dès le mois de juillet dans le nord du Lac (zones 1-2-3), suivie d'une augmentation progressive dans le sud du Lac et dans la lagune de Togoville (zones 4-5-6), avant d'atteindre une homogénéisation de la turbidité

sur l'ensemble du plan d'eau, qui persiste d'octobre 1981 à janvier 1982. En 1982, la saison de crue plus précoce et plus brutale, provoque une augmentation de la turbidité dès le mois de juin et l'homogénéisation sur l'ensemble du plan d'eau a été observée dès le mois d'août. Le minimum de turbidité est régulièrement observé à l'étiage minimum aux mois d'avril et mai, la transparence devenant totale sur l'ensemble de la tranche d'eau au mois d'avril. Cette baisse de la turbidité des eaux à l'étiage, intervient progressivement en commençant par la partie est de la lagune de Togoville au niveau d'Abati Kope où une transparence totale a été observée dès le mois de janvier en 1981 et dès le mois de novembre en 82, alors que la partie ouest de la lagune présentait encore de très fortes turbidités voisines de celles du Lac. Par la suite, le phénomène s'étend au Lac en progressant du sud vers le nord, mais on constatera toujours une turbidité plus faible le long de la côte est du Lac que sur le reste du plan d'eau. Cette différence qui se manifeste parfois brutalement peut trouver son origine dans deux phénomènes qui ne sont d'ailleurs pas incompatibles, à savoir, l'influence de la remise en suspension des sédiments par le brassage mécanique des eaux, favorisée dans les zones les moins profondes du Lac ou bien la remontée progressive d'une eau d'origine marine, moins turbide et plus salée. L'hypothèse de l'existence à ce contact entre les eaux du Lac ss. et les eaux lagunaires plus salées, d'un phénomène de floculation des argiles en suspension, n'est pas à exclure, bien qu'aucune corrélation directe entre la turbidité et la salinité des eaux ne soit apparue nettement.

La transparence des eaux lagunaires du Togo est très inférieure à celle mesurée par la même méthode sur le Lac Nokoué au Bénin, pour lequel la profondeur, la dispersion des crues sur l'ensemble du plan d'eau et l'influence des eaux marines, sont beaucoup plus importantes. Une transmission de la lumière par mètre inférieure à 0,1 % n'est pas rare sur l'ensemble du Lac Togo en période de persistance des eaux de crue par très faible profondeur, (en début de l'étiage janvier 1982) et la transmission maximum est observée en lagune de Togoville avant l'arrivée de la crue en juillet 1981 : 25,9 %. TEXIER et al. (1980) relèvent une transmission supérieure à 30 % au centre du Lac Nokoué à l'étiage.

1.4.2 Variations journalières

Des mesures de transparence ont été effectuées aux stations A, B, C précédemment décrites (cf. Fig. 18), pendant la période d'étiage le 22-4-81 et pendant la période de crue le 10-7-81.

Les tableaux 15 et 16 suivants regroupent les résultats obtenus au cours de ces deux journées et soulignent la relative stabilité de la transparence des eaux en période d'étiage, ainsi que les variations journalières importantes constatées pendant le période de crue où une grande quantité de matière est remise en suspension au cours de la journée par le brassage mécanique des eaux.

On retrouvera lors de ces deux études, la turbidité moins élevée des zones plus profondes de la côte est du Lac (station C).

STATIONS	PROFONDEUR (m)	SECCHI (m)	
		11 h	16 h
A	1,00	0,65	0,63
B	1,10	1,00	0,90
C	1,50	1,00	0,80

Tableau 15 : Variations journalières de la transparence des eaux dans le sud du Lac à l'étiage, le 22-4-81.

STATIONS	PROFONDEUR (m)	SECCHI (m)				
		6h	9h	11h	15h	16h30
A	2,05	1,50	1,25	1,00	0,90	0,90
C	2,55	2,00	1,50	1,55	1,00	0,95

Tableau 16 : Variations journalières de la transparence des eaux dans le sud du Lac en crue, le 10-7-81.

1.5 Les matières en suspension

Le tableau 17 présente les valeurs maximales et minimales de la charge solide des eaux du Lac Togo, les 25-5-81 et 3-6-81 à la fin de l'étiage minimum, et le 25-6-81, au début de la reprise de l'écoulement des tributaires. Les variations spatiales observées sont telles qu'aucun calcul de valeur moyenne ne serait significatif.

	ZONE	MES MAXI mg/l	MES MINI mg/l
LE 25-5-81	1-2-3	390	27
	4-5	124	16
LE 3-6-81	1	217	41
	2	245	19
	3	146	9
	4	189	19
	5	201	2,5
	6	33	1,5
	7	26	7,5
LE 25-6-81	1	40	11
	2	60	15
	3	151	9
	4	100	17
	5	116	14

Tableau 17 : Valeurs extrêmes des MES des eaux du Lac Togo en début de saison de crue 1981, exprimées en mg/l.

Quelques expériences ont montré que les variations journalières de la charge solide des eaux du Lac restaient négligeables, mais on retiendra à titre d'exemple, les variations de MES, en mg/l observées au centre de la zone sud du Lac, au cours de la journée du 25-5-81. Profondeur de la station : 1,40 m.

Profondeur de l'échantillon	8 heures	16 heures
0,30 m	26 mg/l	16 mg/l
1,15 m	30 mg/l	124 mg/l

1.6 Conductivité des eaux : traceur salin

1.6.1 Les relations conductivité-charge saline

1.6.1.1 Relations : conductivité-charge cationique

Nous avons établi la corrélation entre la conductivité X des eaux lagunaires, et la somme p^+ des teneurs en cations sodium (Na^+), potassium (K^+), calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}), exprimées en milliéquivalents par litre.

La Fig. 21 présente la courbe de variation $p^+ = f(X)$ pour toute la gamme des valeurs observées. Une seule équation de régression a été établie pour l'ensemble des 223 couples de valeurs retenus, avec un coefficient de corrélation de 0,991 :

$$\underset{\text{méq/l}}{p^+} = (Na^+) + (K^+) + (Ca^{2+}) + (Mg^{2+})$$

$$\underset{\text{méq/l}}{p^+} = 6{,}667 \,.10^{-3} \,.\underset{\mu\text{mho/cm à } 25°C}{X^{1{,}041}}$$

Précision moyenne de la régression = 15 %.

1.6.1.2 Relation : conductivité-salinité

Dans le but de faciliter l'utilisation des résultats, nous avons établi la corrélation entre la conductivité des eaux lagunaires, qui reste un paramètre très accessible avec précision et la salinité des eaux.

a - Tout d'abord, nous avons envisagé la salinité partielle des eaux exprimées en gramme par litre de chlorure de sodium qui représentent le sel dominant en solution dans les eaux lagunaires au Togo et qui pourra être utilisé ultérieurement dans l'établissement des stocks salins lagunaires. Trois formules de corrélation ont été calculées à partir des mesures précises d'ion sodium effectuées sur les échantillons d'eau.

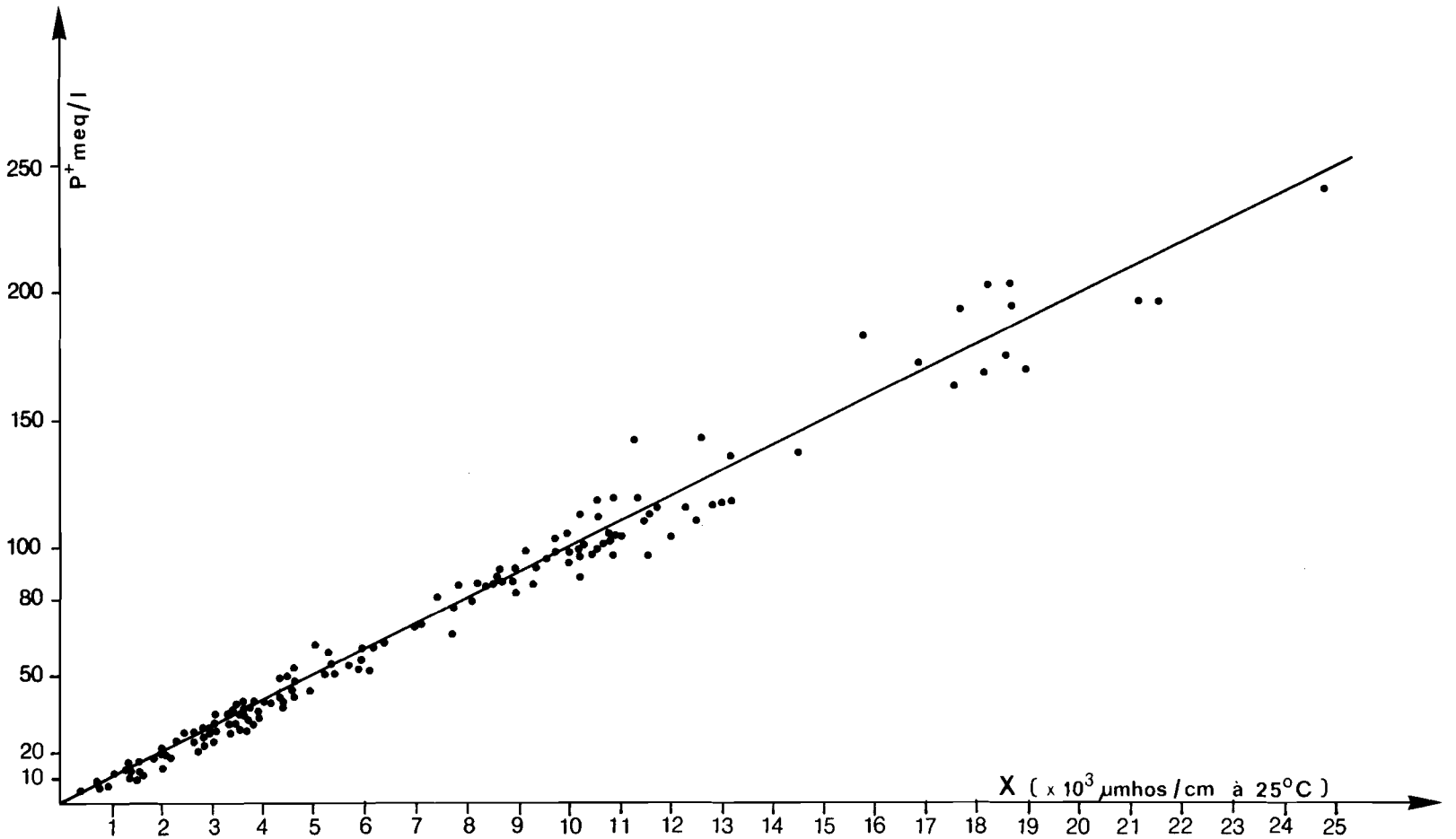


Fig-21 CORRELATION ENTRE LA CONDUCTIVITE DES EAUX LAGUNAIRES ET LEUR CHARGE CATIONIQUE

- 0 < X < 900 µmho/cm à 25°C

  116 couples de valeurs
  coefficient de corrélation 0,986
  précision de la courbe 10%
  $(NaCl)g/l = 3.917 \cdot 10^{-5} \cdot X^{1.323}$

- 900 < X < 6000 µmho/cm à 25°C

  246 couples de valeurs
  coefficient de corrélation 0,990
  précision de la courbe 15 %
  $(NaCl)g/l = 2.164 \cdot 10^{-4} \cdot X^{1,069}$

- 6000 < X < 45000 µmho/cm à 25°C

  406 couples de valeurs
  coefficient de corrélation 0,904
  précision de la courbe 15 %
  $(NaCl)g/l = 1.271 \cdot 10^{-4} \cdot X^{1.133}$

b - D'autre part, afin de pouvoir comparer les valeurs de salinité des eaux lagunaires avec les mesures effectuées sur des milieux similaires, nous avons établi la correspondance entre les valeurs de conductivité et la "salinité pratique 78", S, des eaux lagunaires, telle que la définissent les derniers rapports UNESCO/ICES/SCOR/IAPSO, (1981).

En effet, depuis les travaux de KNUDSEN et al., (1902), la salinité S °/oo des eaux océaniques était définie en terme de chlorinité (Cl °/oo) à partir de la formule de base suivante :

$$S\ ^{o}/oo = 0,03 + 1,805 \cdot Cl\ ^{o}/oo$$

Les mesures de la composition ionique de l'eau de mer ayant été effectuée sur une gamme d'échantillon d'eau de la Mer Baltique, de la Méditerranée et de la Mer Rouge.

Cette approche s'étant révélée totalement insuffisante, et inadaptée devant les fluctuations régionales de la composition ionique des eaux océaniques, les travaux de COX et al., (1966) contribuèrent à la définition de la salinité de l'eau de mer en terme de rapport de conductivité, et proposèrent la formule suivante (d'après "International Oceanographic Table UNESCO, 1966) :

$$S\ ^{o}/oo = 0,08996 + 28,29729\ R_{15} + 12,80832\ R_{15}^{2} - 10,67869\ R_{15}^{3} + 5,98624\ R_{15}^{4} - 1,32311\ R_{15}^{5}$$

R_{15} étant le rapport de la conductivité à 15°C à pression atmosphèrique normale, d'une eau de mer de salinité S ($^{o}/oo$), sur la conductivité d'une eau de mer standard, définie à Copenhagen, aux mêmes température et pression atmosphérique et de salinité 35 $^{o}/oo$. Des tables de correspondances entre conductivité et salinité des eaux ont ainsi été établies pour des valeurs de salinité de 29 à 42 $^{o}/oo$ et des températures de 10 à 31°C, à partir d'une gamme d'échantillons naturels d'eau de mer. Cette correspondance ne tarda pas à devenir insuffisante devant l'augmentation du nombre de relevés océanographiques effectués à des températures inférieures à 10°C et pour des eaux de mer de composition ionique légèrement différente.

Les récents travaux effectués sous l'obédience de l'UNESCO/ICES-/SCOR/IAPSO, (1981), ont proposés la définition de la "salinité pratique 78", d'une eau de mer, qui repose sur une relation entre salinité et rapport de conductivité des eaux, affranchie de toute considération de la composition ionique des eaux océaniques.

La "salinité pratique", S, est définie à partir du rapport K_{15}, entre la conductivité d'un échantillon d'eau de mer à 15°C sous pression normale et la conductivité d'une solution de chlorure de potassium (KCl) de 32,4356 $^{o}/oo$ aux mêmes température et pression atmosphérique, par la formule suivante (1) :

$$S = 0{,}0080 - 0{,}1692\, K_{15}^{1/2} + 25{,}3851\, K_{15} + 14{,}0941\, K_{15}^{3/2} - 7{,}0261\, K_{15}^{2} + 2{,}7081\, K_{15}^{5/2}$$

par définition :

- Une valeur du rapport $K_{15} = 1$ correspond à une salinité pratique de $S = 35$.
- Toute eau océanique ayant un rapport voisin de l'unité avec la solution de KCl étalon, précédemment définie, peut être considérée comme un nouveau standard dans l'étalonnage des appareils de mesure.
- La salinité pratique est définie comme étant supérieure d'un facteur 1000 à la salinité précédemment utilisée et dépourvue du symbole ($^{o}/oo$).

Des tables de correspondance ont été établies à partir de la dilution et de la concentration d'un seul échantillon d'une eau de mer standard de l'Atlantique Nord, dont la conductivité est définie par rapport à la solution

étalon de KCl (32,4356 $^{o}/oo$) à 15°C, ce qui permet à la fois la reproductivité de l'échantillon standard, et la conservation d'une même composition ionique sur toute la gamme de salinité considérée.

Toutes eaux de mer, quelles qu'elles soient, ayant un même rapport de conductivité, ont par conséquent exactement la même salinité pratique. La chlorinité n'est plus alors considérée que comme un simple paramètre indépendant, contribuant à la définition de la qualité des eaux océaniques.

De façon pratique, si R_t est le rapport entre la conductivité d'une eau de mer à température t et pression normale et la conductivité d'une eau de mer de salinité pratique S = 35, aux mêmes température et pression, il peut être confondu à t = 15°C avec le rapport précédemment défini K_{15}, et utilisé dans la formule (1).

La différence entre les rapports calculés à température t ou à 15°C, peut apparaître sous forme d'un terme correctif de température ΔS, dans la formule définie comme suit (2) :

$$S = 0{,}0080 - 0{,}1692\, R_t^{1/2} + 25{,}3851\, R_t + 14{,}0941\, R_t^{3/2} - 7{,}0261\, R_t^{2} + 2{,}7081\, R_t^{5/2} + \Delta S$$

$$\text{avec } \Delta S = \frac{(t - 15)}{1 + 0{,}0162\,(t - 15)} \cdot \left(0{,}0005 - 0{,}0056\, R_t^{1/2} - 0{,}0066\, R_t - 0{,}0375\, R_t^{3/2} + 0{,}0636\, R_t^{2} - 0{,}0144\, R_t^{5/2}\right)$$

Les tables publiées par l'UNESCO (1981) présentent les valeurs de la salinité pratique des eaux à partir des rapports de conductivité R_{15} établis à 15°C, sur une gamme de S = 2 à 42 ; ainsi que les corrections de température sur une gamme de -2 à 35°C.

Toutefois, il reste à noter que cette approche de la salinité d'une eau de mer, qui peut être étendue à de fortes concentrations ou de faibles dilutions, ne peut s'appliquer qu'à des eaux ayant la <u>même composition ionique de l'eau de mer</u> . On introduit immédiatement une erreur pouvant être importante dès que l'on utilise les formules précédemment définies, pour caractériser une eau saumâtre sous influence continentale partielle, ce qui est fréquent en milieu lagunaire.

(d'après E.L. LEWIS.IEEE Journal of Océanic Engineering Vol. OE - 5, n° 1, 1980, In : "UNESCO Technical Papers in Marine Science n° 37").

En ce qui concerne le calcul de la salinité pratique des eaux lagunaires au Togo, nous nous sommes référé pour les conductivités supérieures à 4000 µmho.cm à 25°C, aux tables océanographiques de l'UNESCO (1981), en introduisant dans le calcul des rapports de conductivité à 25°C (R_{25}), la valeur de la conductivité de l'eau de mer standard (Atlantique Nord) de salinité S = 35, à température 25°C et sous pression atmosphérique normale X = 53042.509 µmho/cm à 25°C (GAMBERONI - Muséum d'Histoire Naturelle, comm. pers.).

D'autre part, pour les faibles gammes de conductivité (entre 100 et 4000 µmho/cm à 25°C), nous nous sommes référé à la formule d'étalonnage du salinomètre utilisé par TEXIER et al. (1979) sur les eaux lagunaires béninoises :

$$S\ (^{o}/oo) = 5.625\ .\ 10^{-4}\ .X\ (\mu mho/cm\ 25°C) \qquad (3)$$

Les valeurs de salinité calculée par cette dernière formule (3), ont été corrigées d'un pourcentage dégressif, compris entre - 10 % (pour X = 100 µmho/cm) et - 6 % (pour X = 4000 µmho/cm), afin de rétablir une certaine homogénéité avec la formule (2) de la salinité pratique (UNESCO, 1981). La coïncidence entre ces deux formules apparaît pour des conductivités de l'ordre de 10 000 µmho/cm à 25°C et l'écart est à nouveau de 10 % pour des conductivités de l'ordre de 35 000 µmho/cm. Cet écart entre les deux formules n'est jamais supérieur à 10 % pour la gamme de salinité rencontrée sur les lagunes du Togo et du Bénin.

La Figure 22 présente la courbe de variation de la salinité pratique S des eaux lagunaires au Togo, en fonction de la conductivité, à partir du barême présenté en tableau 18.

Tableau 18 : BAREME DES CORRESPONDANCES ENTRE CONDUCTIVITE (X µmho/cm à 25°C) ET SALINITE PRATIQUE (S) DES EAUX LAGUNAIRES

X µmho/cm 25°	S	X µmho/cm 25°	S	X µmho/cm 25°	S	X µmho/cm 25°	S
100	0,050	3 100	1,62	14 000	8,09	29 000	17.9
200	0,100	3 200	1,67	14 500	8,41	29 500	18.2
300	0,150	3 300	1,73	15 000	8,72	30 000	18.6
400	0,200	3 400	1,78	15 500	9,04	30 500	18.9
500	0,250	3 500	1,84	16 000	9,35	31 000	19.2
600	0,300	3 600	1,89	16 500	9,67	31 500	19.6
700	0,356	3 700	1,94	17 000	10.0	32 000	20.0
800	0,407	3 800	2,00	17 500	10.3	32 500	20.3
900	0,458	3 900	2,05	18 000	10.6	33 000	20.6
1 000	0,512	4 000	2,11	18 500	11.0	33 500	21.0
1 100	0,563			19 000	11.3	34 000	21.3
1 200	0,614	4 500	2,40	19 500	11.6	34 500	21.7
1 300	0,665	5 000	2,68	20 000	11.9	35 000	22.0
1 400	0,716	5 500	2,97	20 500	12.2	35 500	22.4
1 500	0,772	6 000	3,25	21 000	12.6	36 000	22.7
1 600	0,823	6 500	3,55	21 500	12.9	36 500	23.1
1 700	0,874	7 000	3,84	22 000	13.2	37 000	23.4
1 800	0,926	7 500	4,13	22 500	13.5	37 500	23.8
1 900	0,978	8 000	4,43	23 000	13.9	38 000	24.1
2 000	1,03	8 500	4,73	23 500	14.2	38 500	24.5
2 100	1,09	9 000	5,03	24 000	14.5	39 000	24.8
2 200	1,14	9 500	5,33	24 500	14.9	39 500	25.2
2 300	1,19	10 000	5,63	25 000	15.2	40 000	25.5
2 400	1,24	10 500	5,93	25 500	15.5	40 500	25.9
2 500	1,30	11 000	6,24	26 000	15.9	41 000	26.2
2 600	1,35	11 500	6,54	26 500	16.2		
2 700	1,40	12 000	6,85	27 000	16.5		
2 800	1,45	12 500	7,16	27 500	16.9		
2 900	1,51	13 000	7,47	28 000	17.2		
3 000	1,57	13 500	7,78	28 500	17.6		

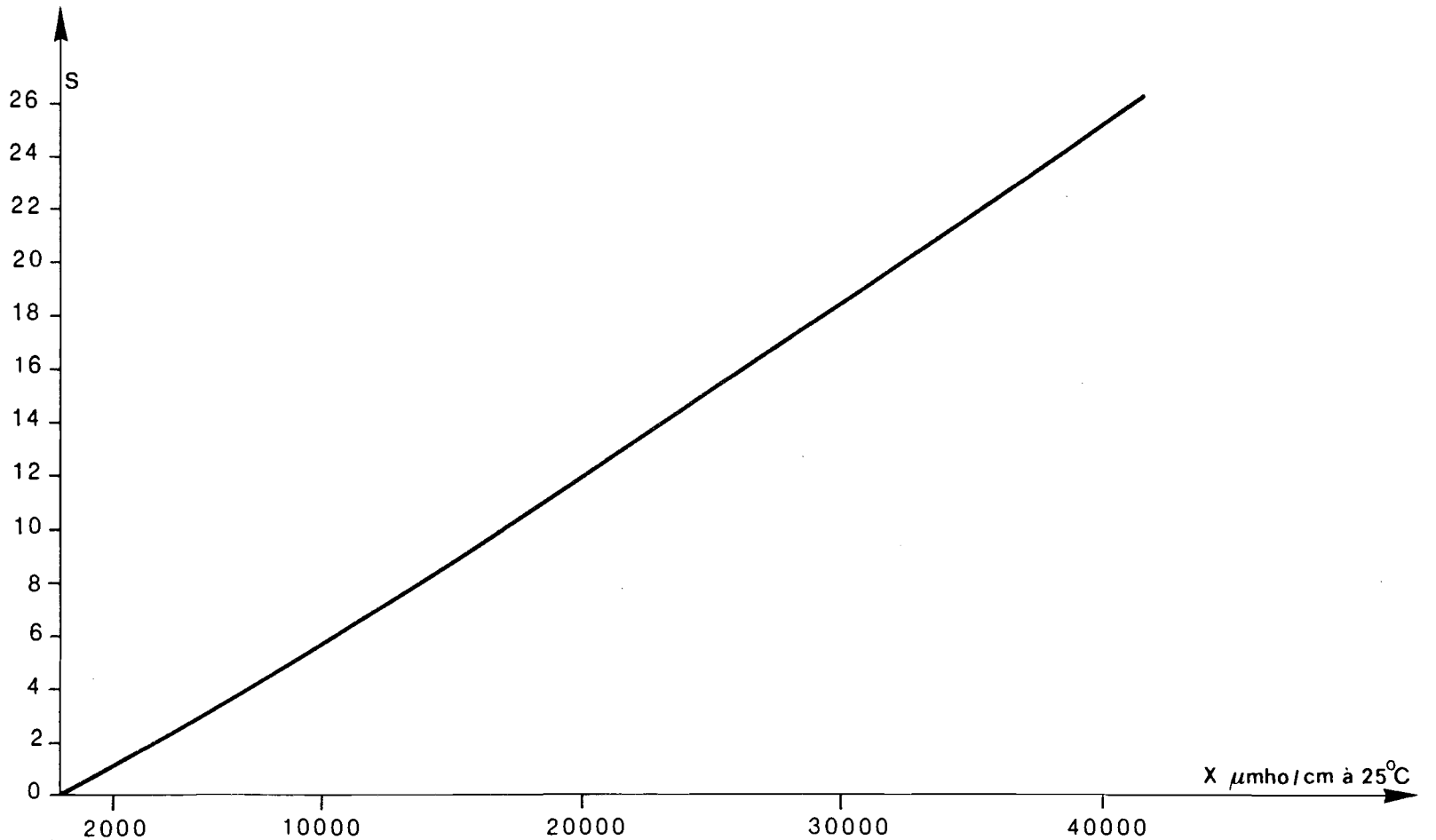


Fig-22 CORRESPONDANCE ENTRE LA CONDUCTIVITE (xµmho / cm à 25°C) ET LA SALINITE PRATIQUE (S) DES EAUX LAGUNAIRES AU TOGO

2 - PRINCIPALES CARACTERISTIQUES HYDROCHIMIQUES DES EAUX

2.1 Variations saisonnières et spatiales de la salinité

2.1.1 Courbes d'isosalinité dans le Lac Togo

Afin de suivre l'évolution de la salinité des eaux du Lac Togo, dans l'espace et dans le temps, nous avons reporté sur fond de carte du Lac Togo, le tracé des courbes d'isosalinité (S) exprimées à partir de la conductivité des eaux, (cf. § 1.6.1), pour chacune des époques caractéristiques de la période d'étude.

Les valeurs de la salinité, ainsi que l'évolution spatiale de la forme des courbes d'isoteneur, permettent de suivre les variations saisonnières de la qualité des eaux du Lac Togo et d'approcher les caractéristiques de la circulation des eaux dans le Lac, problème sur lequel nous reviendrons au chapitre suivant.

Les Fig. 23 à 48 présentent l'évolution chronologique au cours des deux années d'étude, de la salinité des eaux sur l'ensemble du Lac Togo, à partir de l'étiage 80-81, jusqu'au début de l'étiage 82-83.

2.1.2 Variations de la salinité dans les chenaux lagunaires de Togoville et d'Aneho

La Fig. 49 présente le plan de situation des points de surveillance de la qualité des eaux définis sur les bras lagunaires et contrôlés au cours de la période d'étude.

Le tableau 19, présente pour chaque station définie sur les lagunes, les valeurs moyennes de la salinité pratique (S) des eaux lagunaires exprimées à partir de la conductivité et permet de suivre les variations saisonnières de cette salinité des eaux le long des bras lagunaires. On remarquera la différence entre l'étiage 1981 consécutif à l'ouverture du système sur la mer, par rapport à l'étiage 1982 et le début de l'étiage 1983. L'évolution rapide vers l'ouest

d'un fort gradient de salinité au cours de chacun des deux étiages et demi de la période d'observation, est une des caractéristiques fondamentales de la dynamique des eaux lagunaires, sur laquelle nous reviendrons.

En raison de la grande hétérogénéité de la lagune d'Aneho quant aux profondeurs, les valeurs présentées sur le tableau 19 pour les stations 1, 2 et 3, correspondent à un échantillonnage régulièrement effectué à 2 mètres de profondeur.

1981

ZONES \ DATE	05 FEV.	18 MARS	29 AVRIL	26 MAI	25 JUIN	24 JUIL.	08 SEP.	14 OCT.	01 DEC.
1	40 000 (25.5)	- -	35 000 (22)	35 000 (22)	29 000 (17.9)	20 000 (11.9)	10 300 (5.82)	3 200 (1.67)	8 600 (4.78)
2	- -	- -	27 000 (16.5)	20 500 (12.2)	24 500 (14.9)	14 500 (8.41)	7 700 (4.24)	1 800 (0.93)	1 700 (0.87)
3	35 000 (22)	- -	29 000 (17.9)	26 000 (15.9)	20 000 (11.9)	13 000 (7.47)	6 500 (3.54)	4 000 (2.11)	7 800 (4.32)
4	- -	27 500 (16.9)	- -	31 000 (19.3)	20 000 (11.9)	- -	5 500 (2.97)	- -	- -
5	- -	24 000 (14.5)	- -	28 500 (17.6)	20 000 (11.9)	- -	5 500 (2.97)	- -	- -
6	- -	- -	- -	27 000 (16.5)	20 000 (11.9)	13 500 (7.78)	5 000 (2.68)	- -	- -
7	- -	21 500 -	- -	24 500 (14.9)	19 000 (11.3)	- -	4 900 (2.62)	- -	- -
8	- -	20 000 (11.9)	- -	23 000 (13.9)	19 000 (11.3)	12 000 (6.85)	4 800 (2.57)	- -	- -
9	12 500 (7.16)	18 500 (11.0)	- -	21 500 (12.9)	19 000 (11.3)	11 300 (6.43)	4 700 (2.50)	870 (0,44)	550 (0.27)

Tableau 19 : Variations spatiales et saisonnières de la salinité des eaux dans les chenaux lagunaires de Togoville, d'Aneho et de Vogan
40 000 : conductivité en µmho/cm à 25°C
(25.5) : salinité S

1982

DATE ZONES	26 JAN.	24 FEV.	31 MARS	29 AVR.	27 MAI	30 JUIN	03 AOUT	27 SEP.	04 OCT.	18 NOV.	09 DEC.	31 DEC.
1	23 000 (13.9)	25 000 (15.2)	34 000 (21.3)	33 000 (20.6)	27 000 (16.5)	7 400 (4.1)	1 200 (0.61)	3 300 (1.73)	11 500 (6.54)	21 800 (13.1)	23 000 (13.9)	26 000 (15.9)
2	9 100 (5.08)	12 000 (6.85)	31 000 (19.3)	29 000 (17.9)	18 500 (10.95)	5 300 (2.86)	830 (0.42)	2 300 (1.19)	6 400 (3.49)	12 800 (7.35)	15 500 (9.04)	19 000 (11.3)
3	11 500 (6.54)	16 500 (9.67)	30 000 (18.6)	28 000 (17.2)	18 500 (11.0)	4 700 (2.5)	2 400 (1.24)	1 100 (0.56)	4 600 (2.45)	10 200 (5.74)	16 500 (9.67)	18 000 (10.6)
4	5 900 (3.20)	13 300 (7.66)	19 500 (11.6)	19 000 (11.3)	13 200 (7.58)	3 800 (2.0)	550 (0.27)	- -	900 (0.46)	3 000 (1.57)	6 000 (3.25)	13 500 (7.78)
5	2 800 (1.46)	10 700 (6.05)	19 500 (11.6)	19 000 (11.3)	11 000 (6.24)	3 600 (1.89)	550 (0.27)	- -	900 (0.46)	2 650 (1.37)	5 400 (2.91)	8 700 (4.84)
6	1 100 (0.56)	7 800 (4.32)	15 800 (9.24)	15 700 (9.15)	10 500 (5.94)	3 850 (2.02)	560 (0.27)	- -	870 (0.44)	2 200 (1.14)	3 750 (1.97)	5 000 (2.68)
7	980 (0.50)	5 800 (3.15)	13 800 (7.98)	13 800 (7.98)	10 300 (5.82)	3 500 (1.84)	460 (0.23)	- -	760 (0.38)	1 500 (0.77)	3 100 (1.62)	3 600 (1.89)
8	900 (0.46)	5 200 (2.79)	13 000 (7.47)	13 500 (7.78)	9 500 (5.33)	3 500 (1.84)	460 (0.23)	- -	760 (0.38)	1 400 (0.72)	2 550 (1.33)	3 500 (1.84)
9	900 (0.46)	4 700 (2.50)	12 600 (7.22)	13 500 (7.78)	9 300 (5.19)	3 500 (1.84)	400 (0.20)	- -	740 (0.38)	1 370 (0.70)	2 200 (1.14)	3 100 (1.62)
10	- -	- -	- -	13 000 (7.47)	10 200 (5.74)	2 800 (1.46)	- -	- -	- -	- -	- -	- -
11	- -	- -	- -	4 900 (2.63)	3 700 (1.95)	800 (0.41)	1 140 (0.58)	- -	3 800 (2.0)	6 600 (3.60)	6 300 (3.44)	4 000 (2.11)

Variations spatiales et saisonnières de la salinité des eaux dans les chenaux lagunaires de Togoville, d'Aneho et de Vogan

30 000 : conductivité en µmhos/cm à 25°C

(18.6) : salinité S

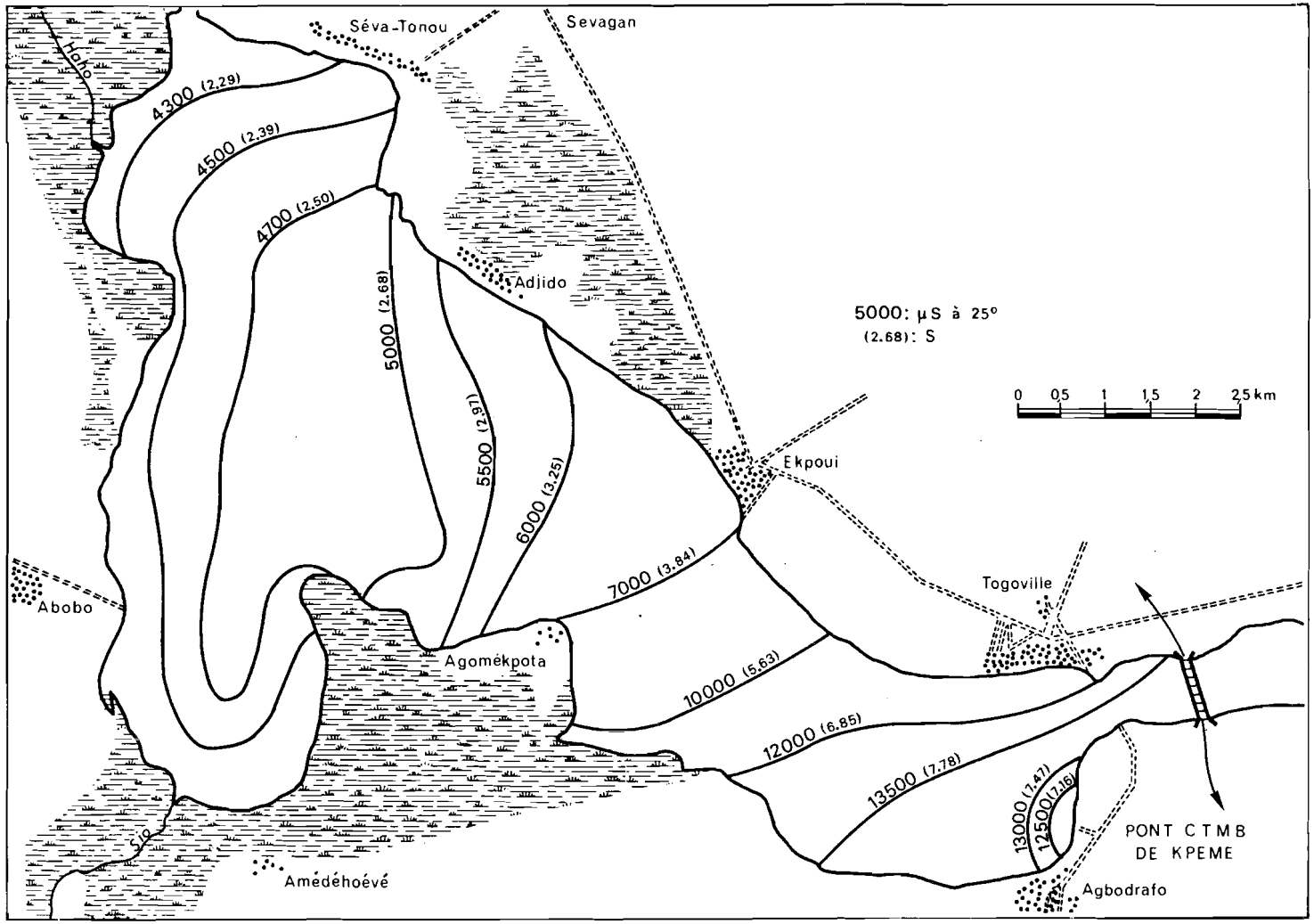


Fig-23 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 24 Février 1981

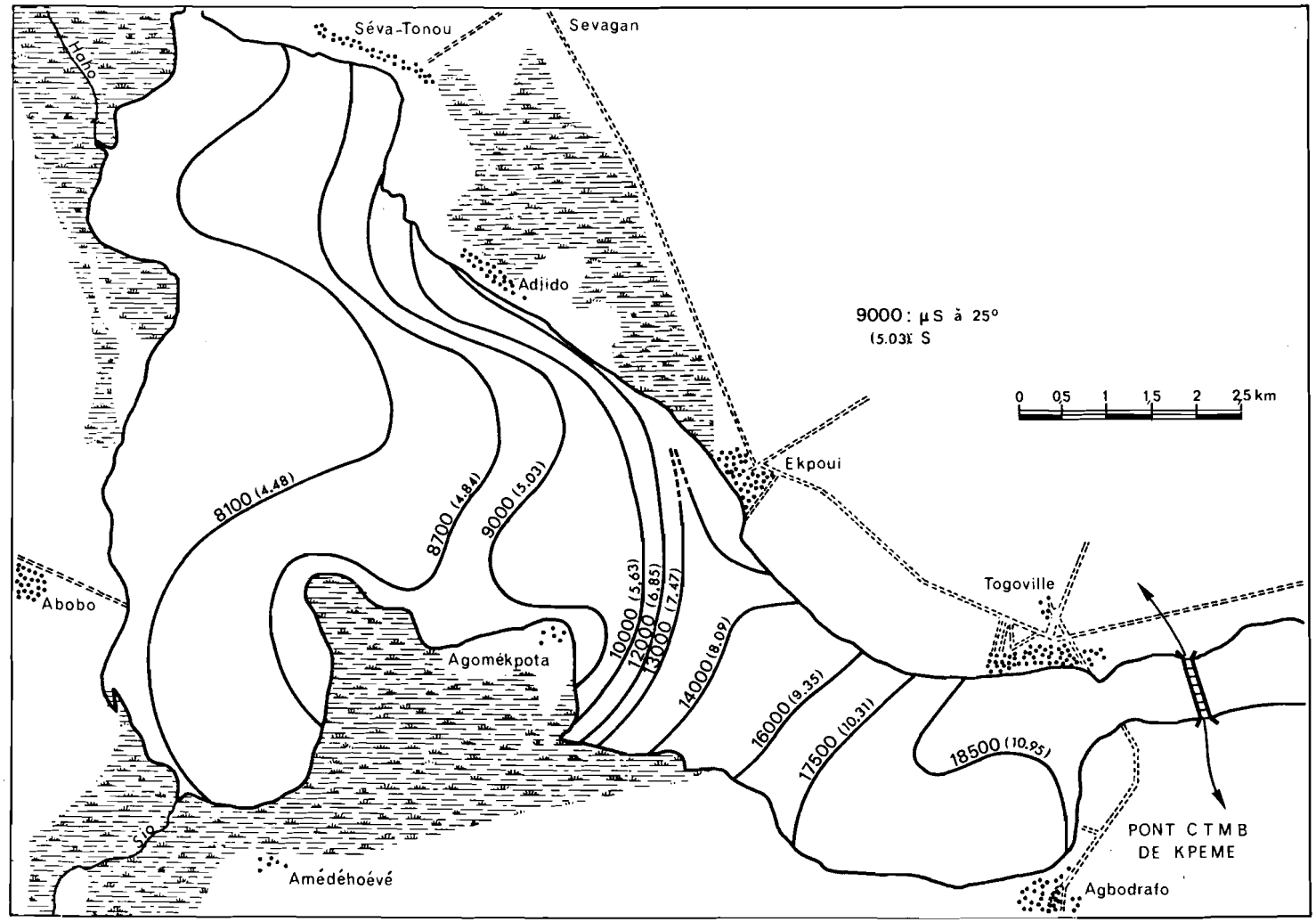


Fig-24 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 31 Mars 1981

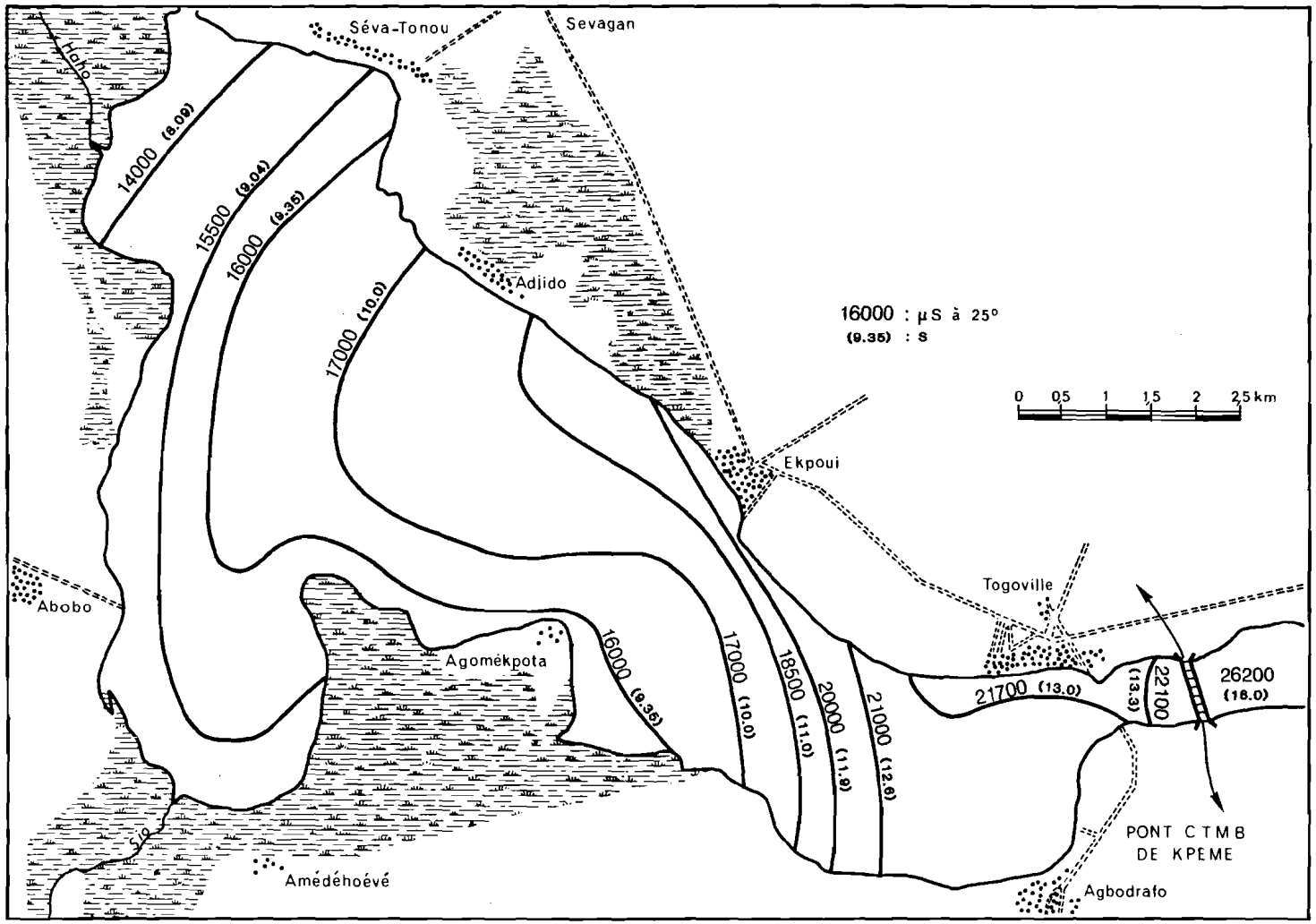


Fig-25 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN SURFACE Le 26 Mai 1981

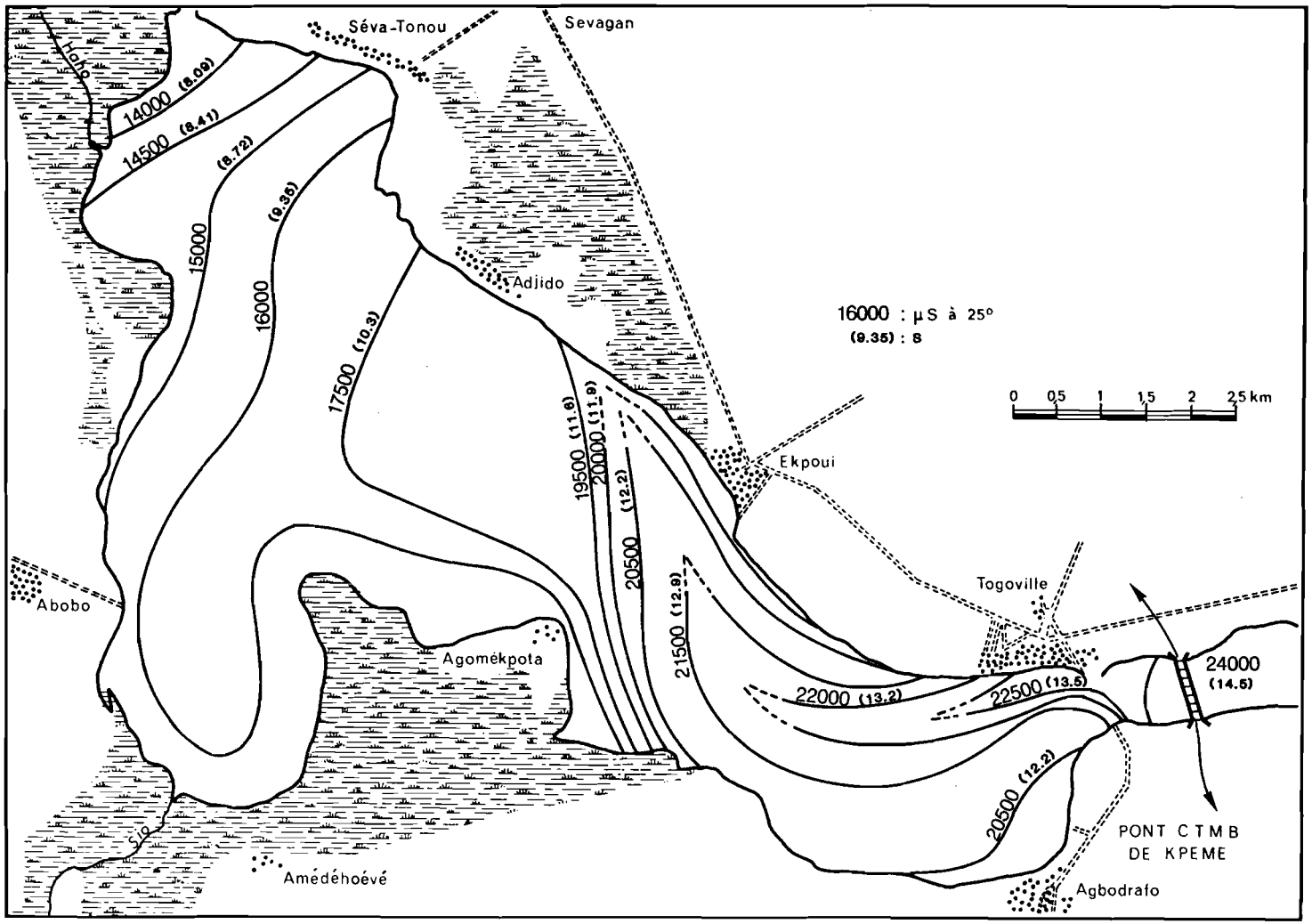


Fig-26 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN PROFONDEUR Le 26 Mai 1981

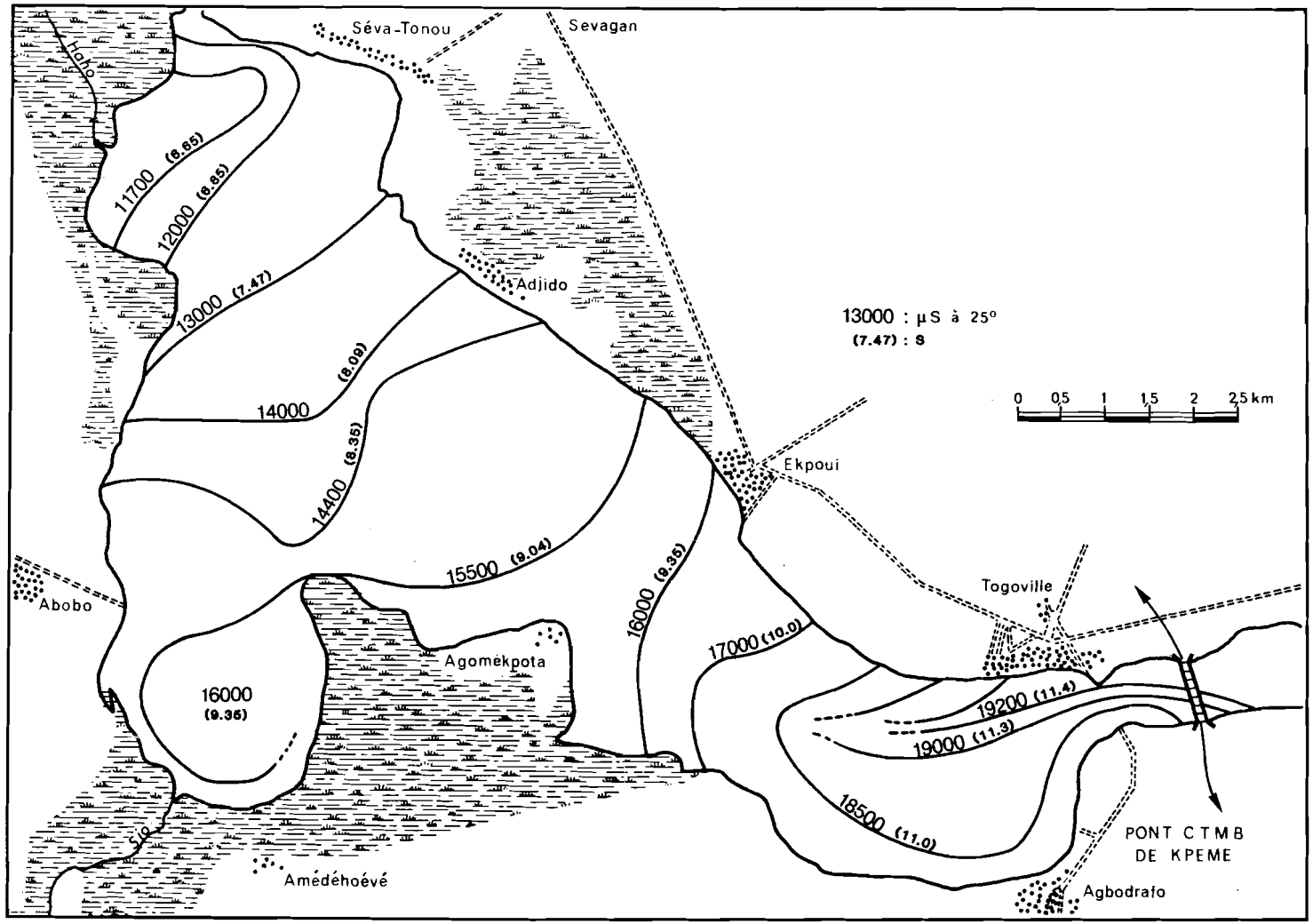


Fig-27 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN SURFACE Le 25 Juin 1981

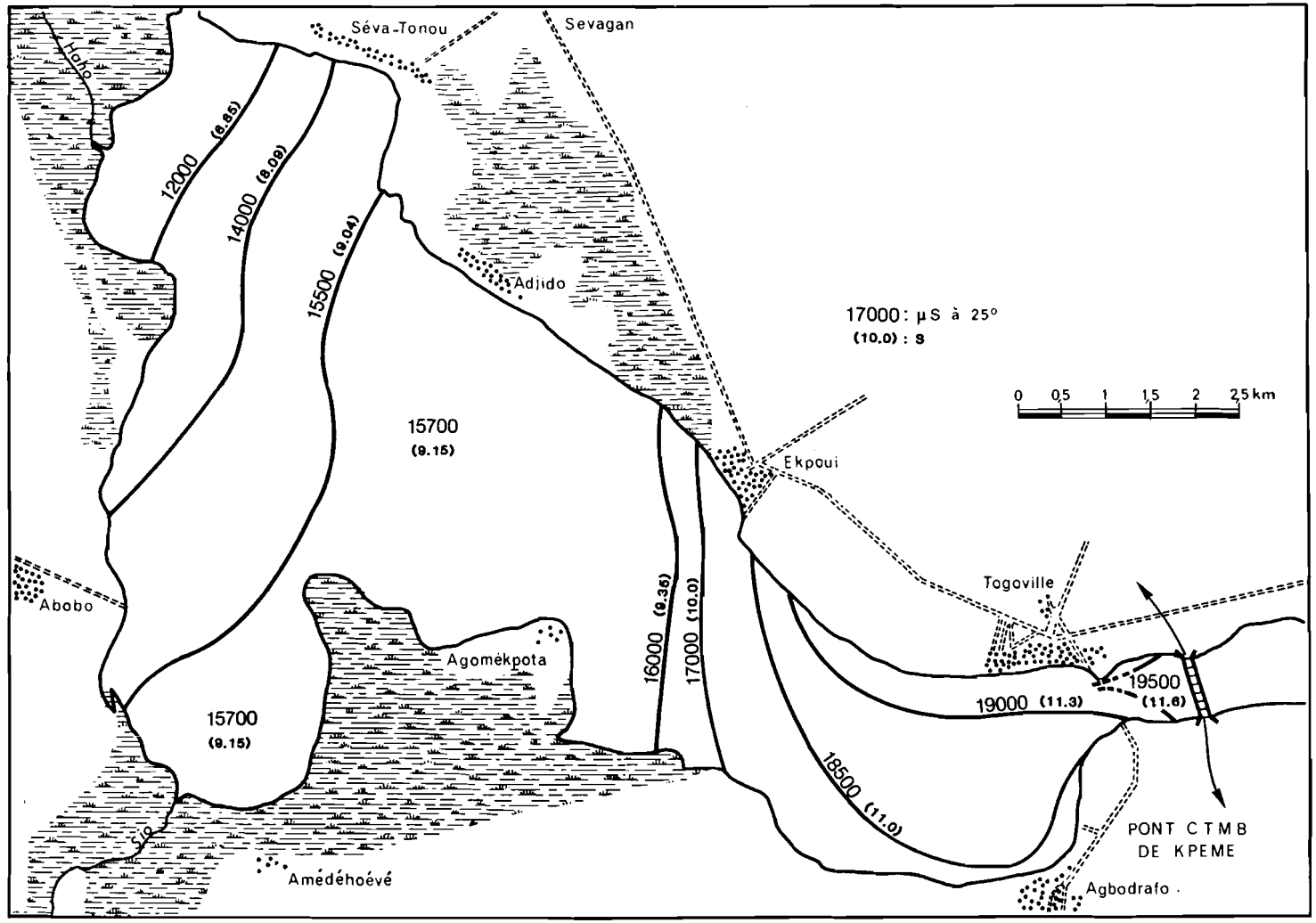


Fig-28 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN PROFONDEUR Le 25 Juin 1981

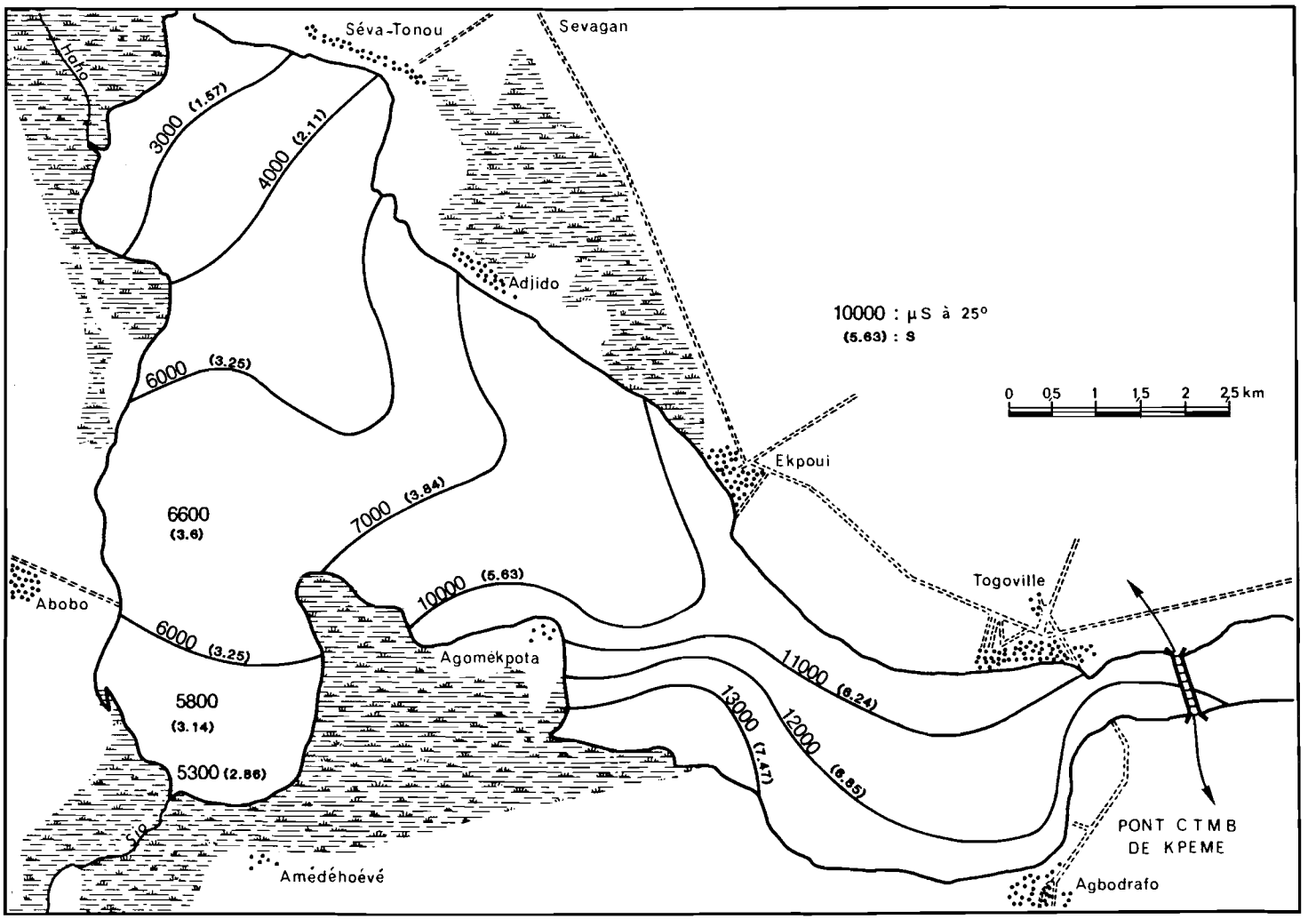


Fig-29 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN SURFACE Le 24 Juillet 1981

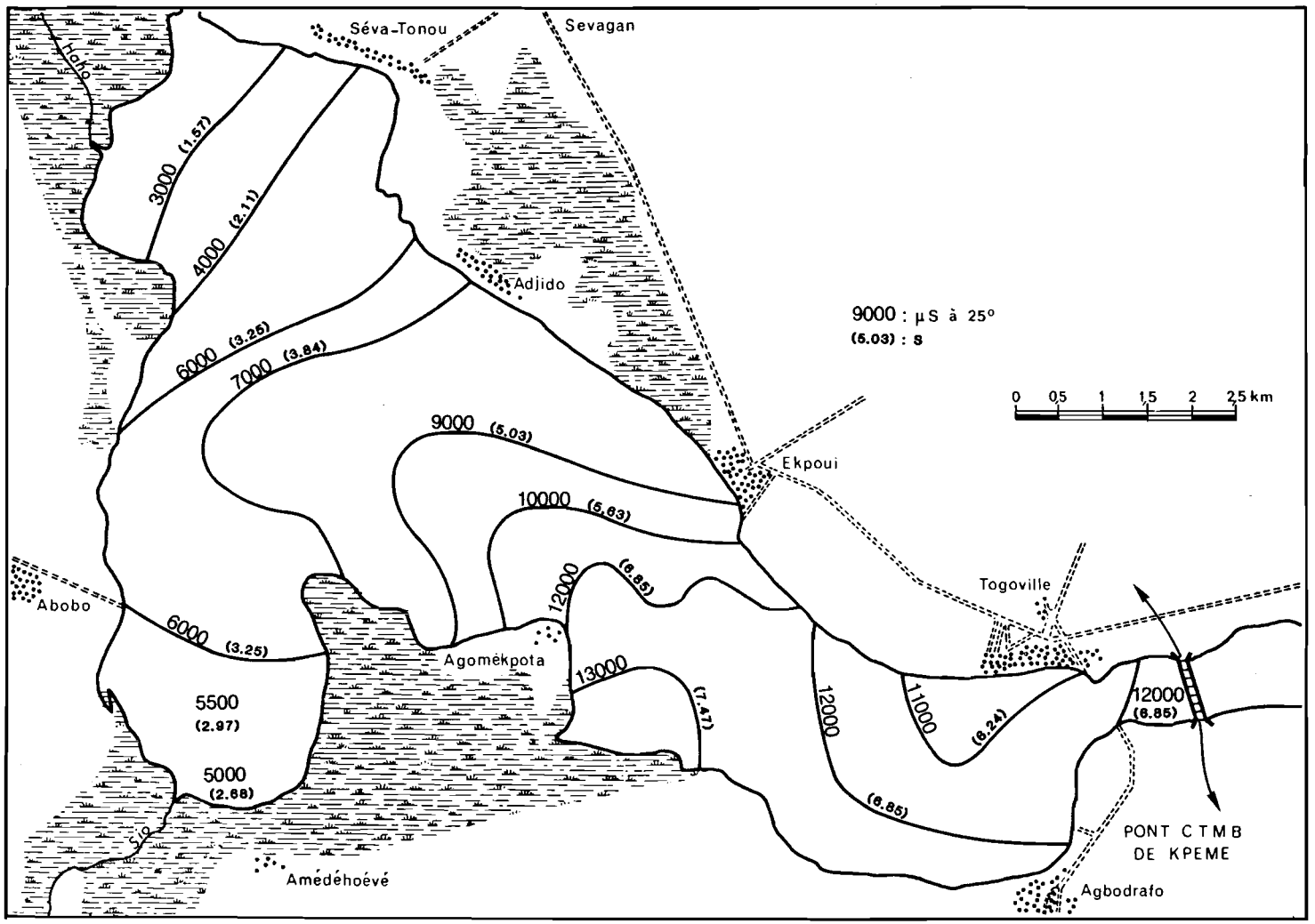


Fig-30 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN PROFONDEUR Le 24 Juillet 1981

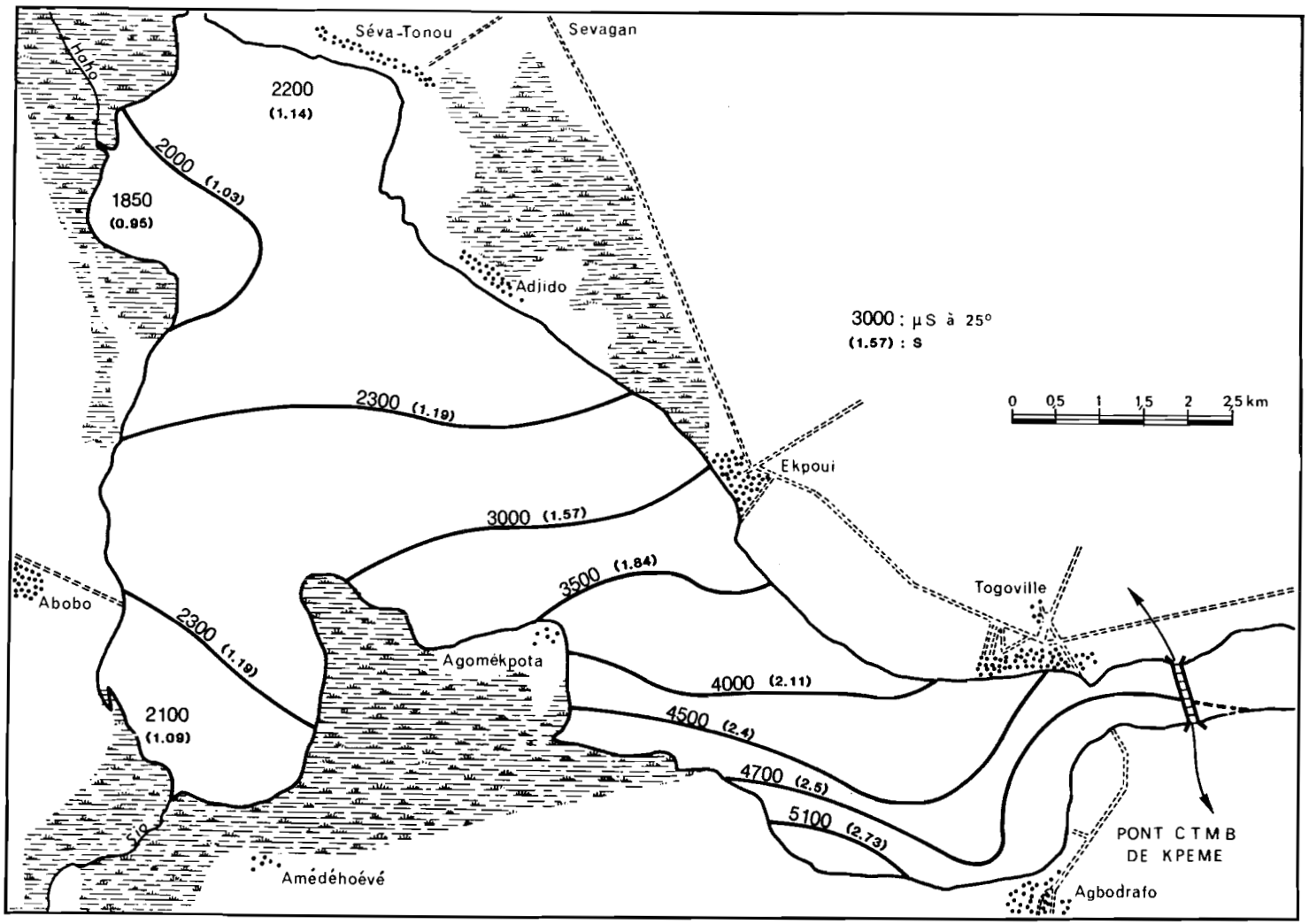


Fig-31 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 8 Septembre 1981

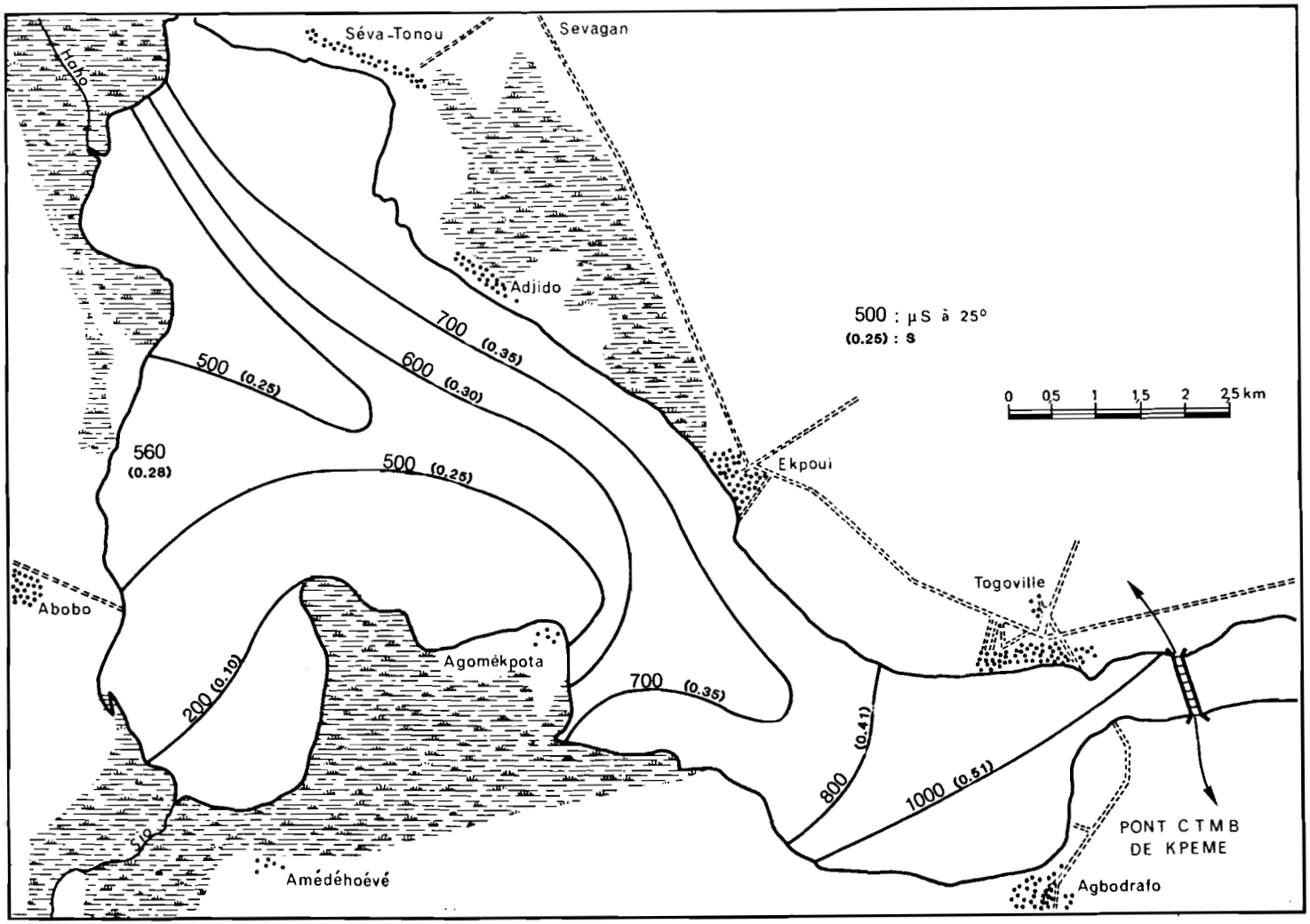


Fig-32 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 14 Octobre 1981

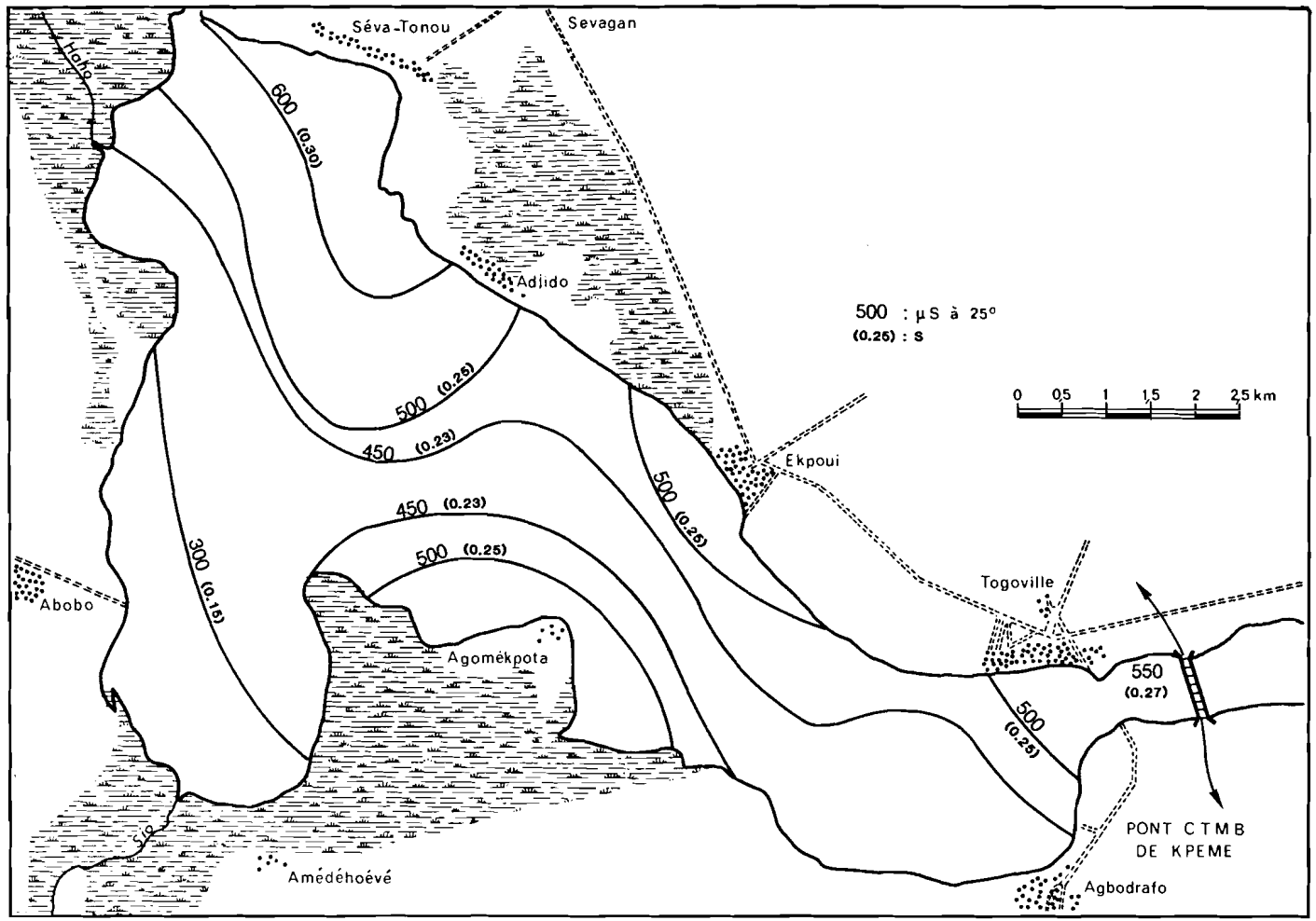


Fig-33 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 1 Décembre 1981

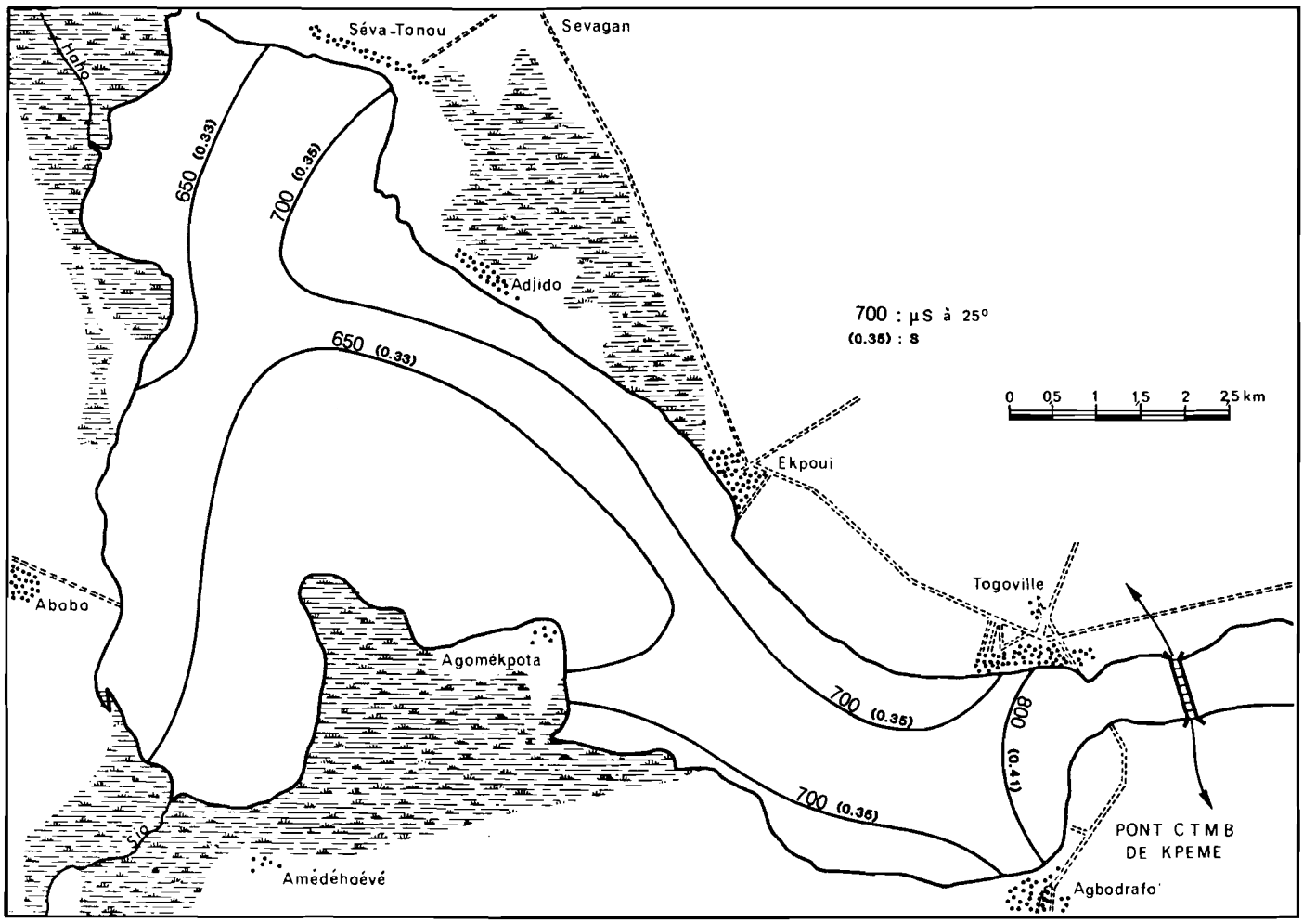


Fig-34 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 26 Janvier 1981

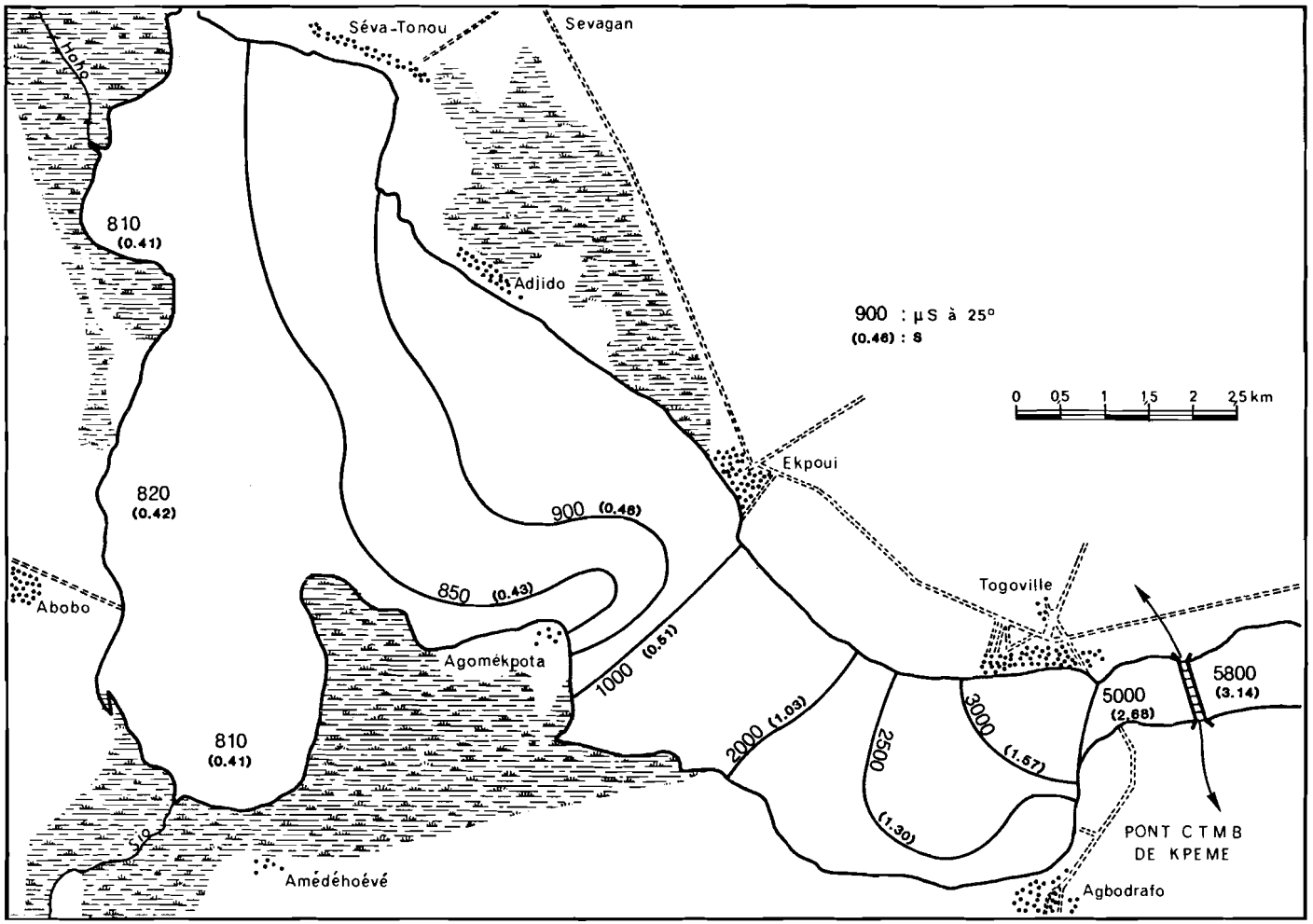


Fig-35 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 24 Février 1982

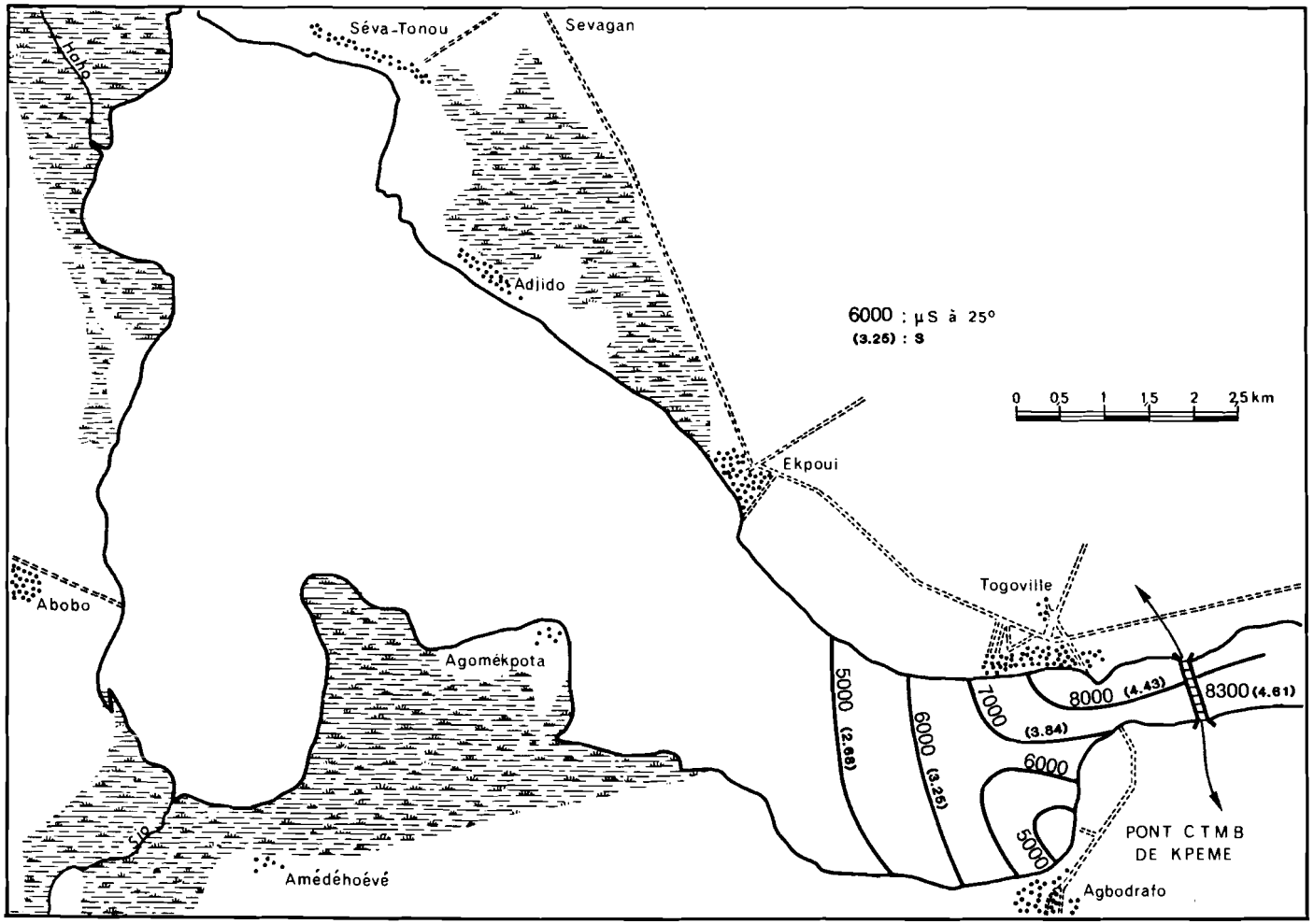


Fig-36 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN SURFACE Le 9 Mars 1982

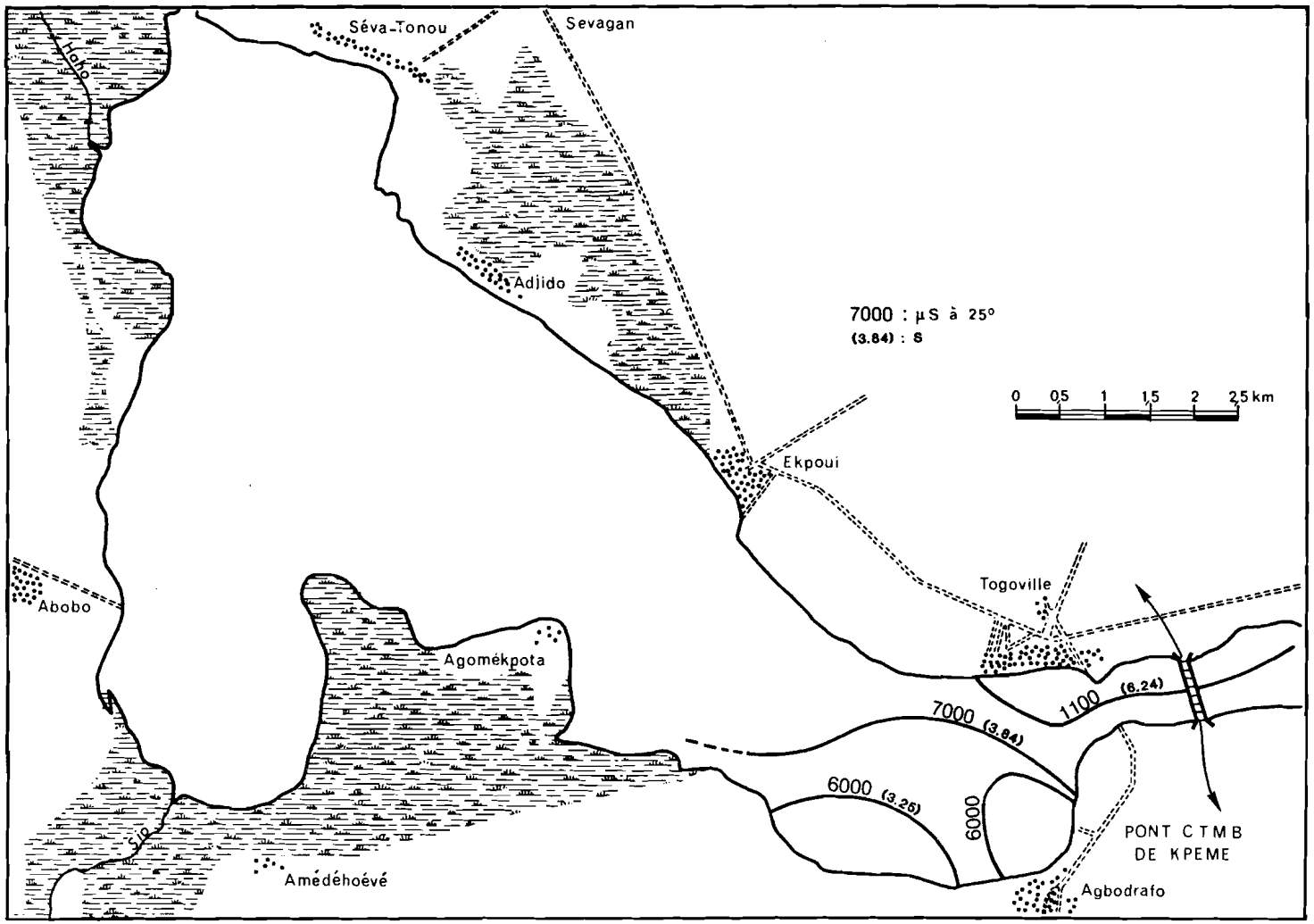


Fig-37 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN PROFONDEUR Le 9 Mars 1982

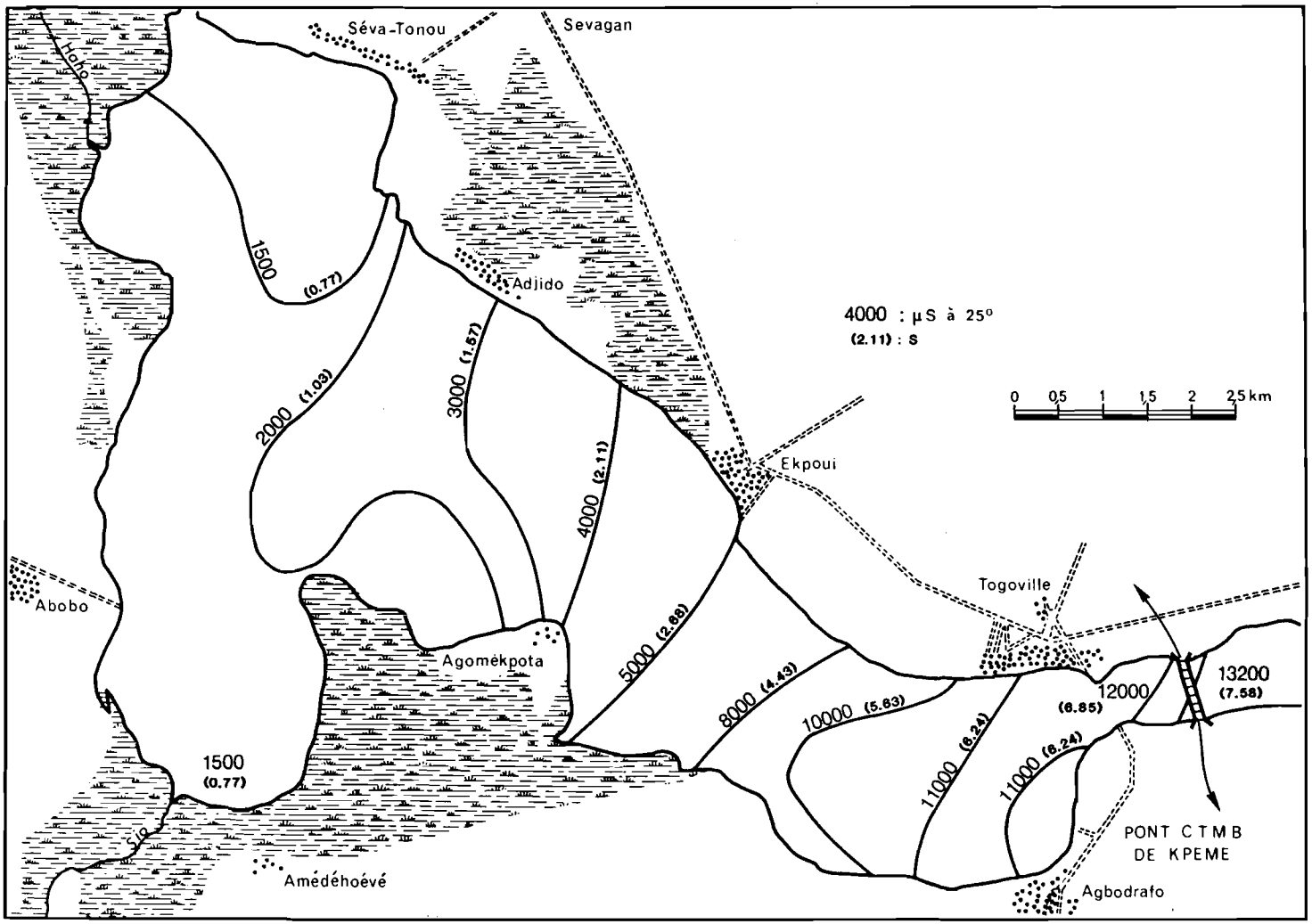


Fig-38 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 31 Mars 1982

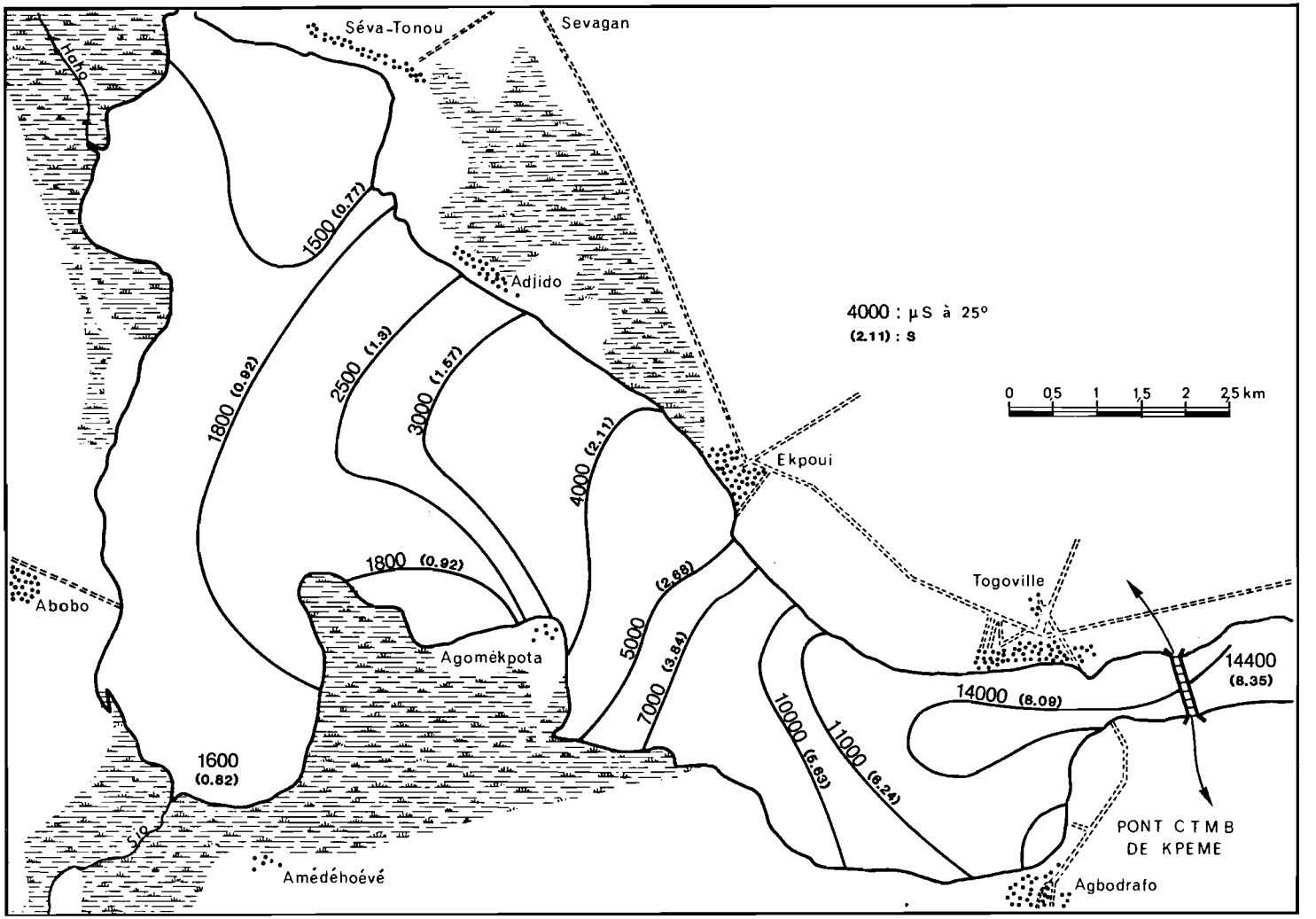


Fig-39 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE EN PROFONDEUR Le 31 Mars 1982

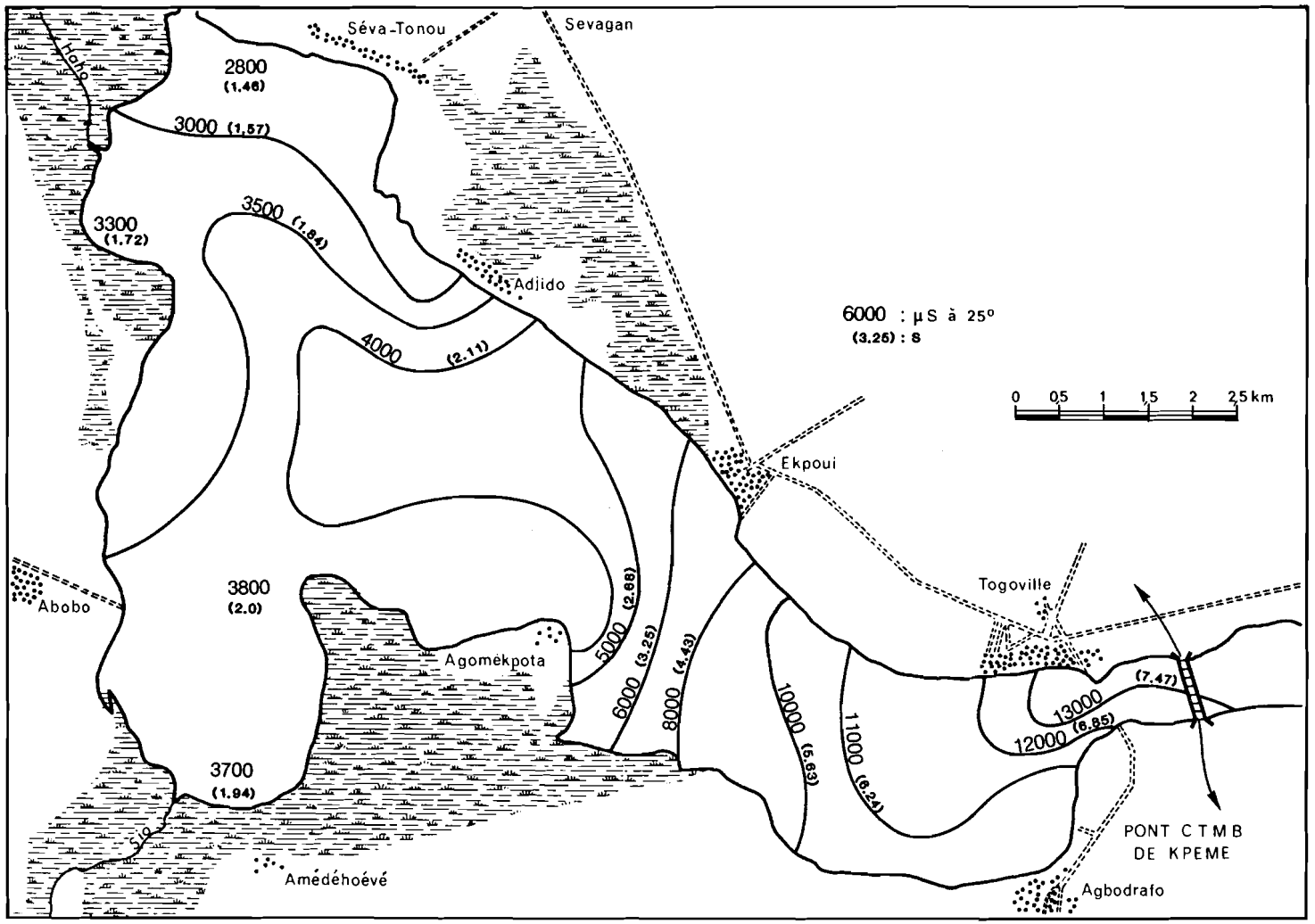


Fig-40 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 29 Avril 1982

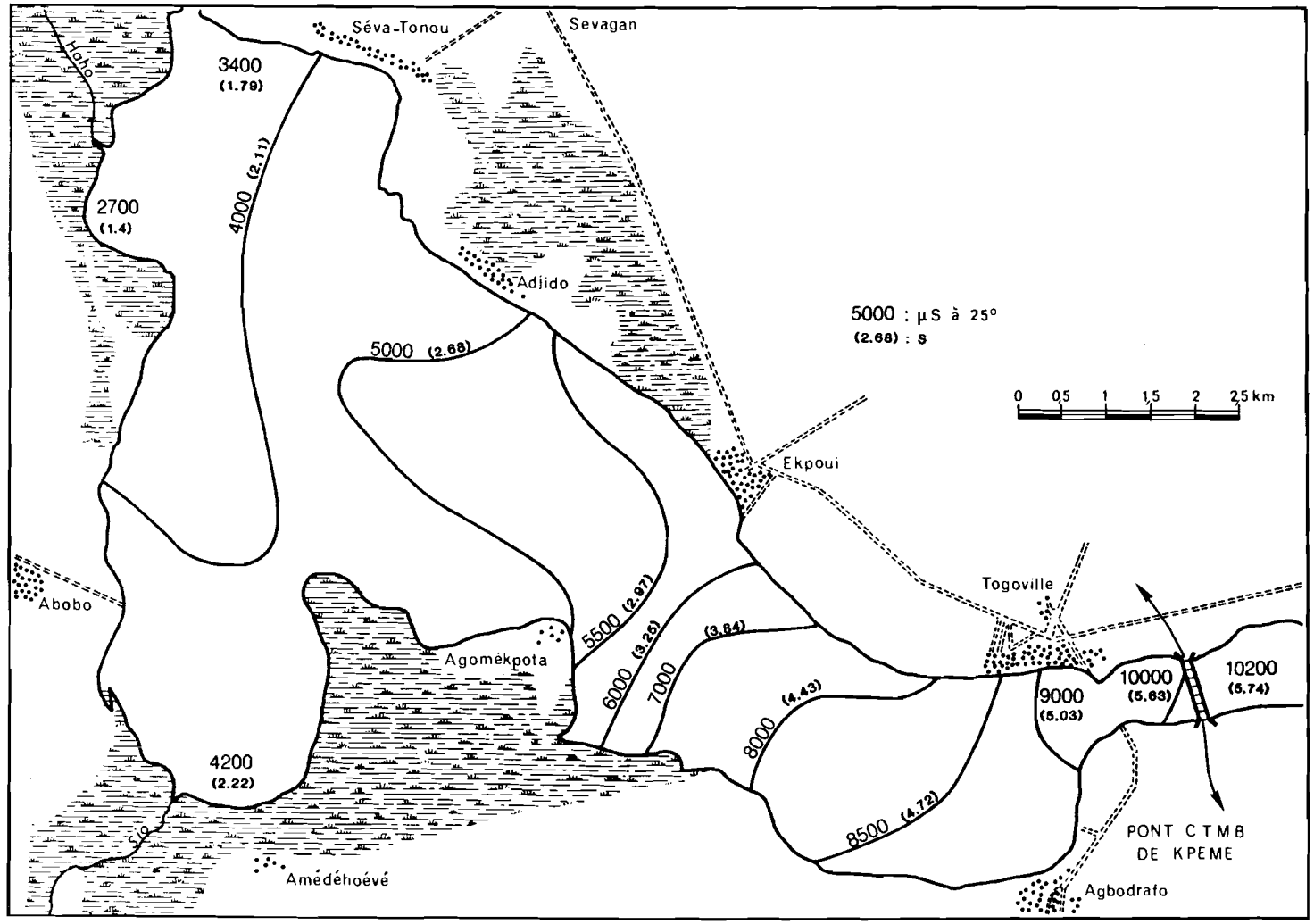


Fig-41 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 27 Mai 1982

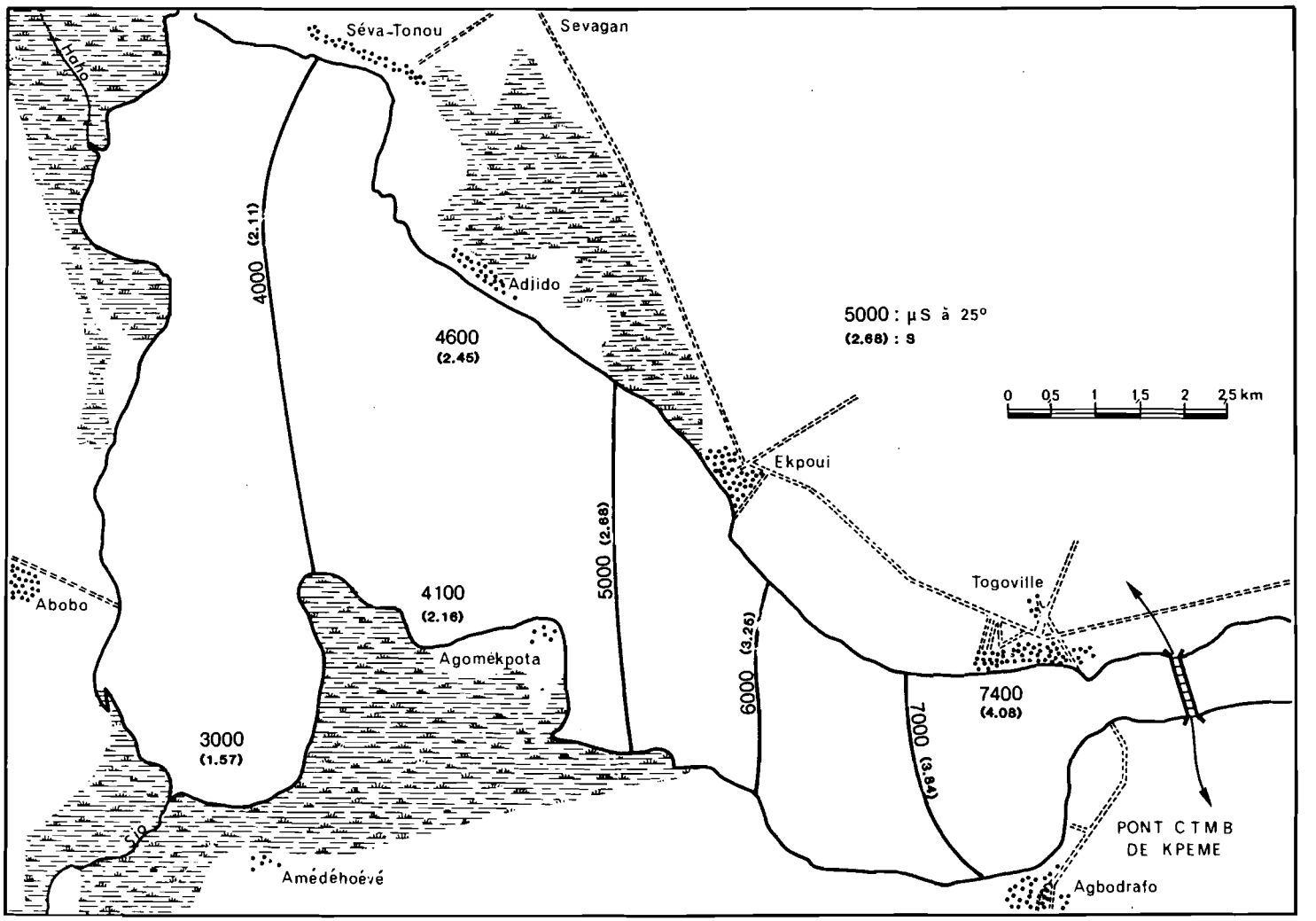


Fig-42 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 8 Juin 1982

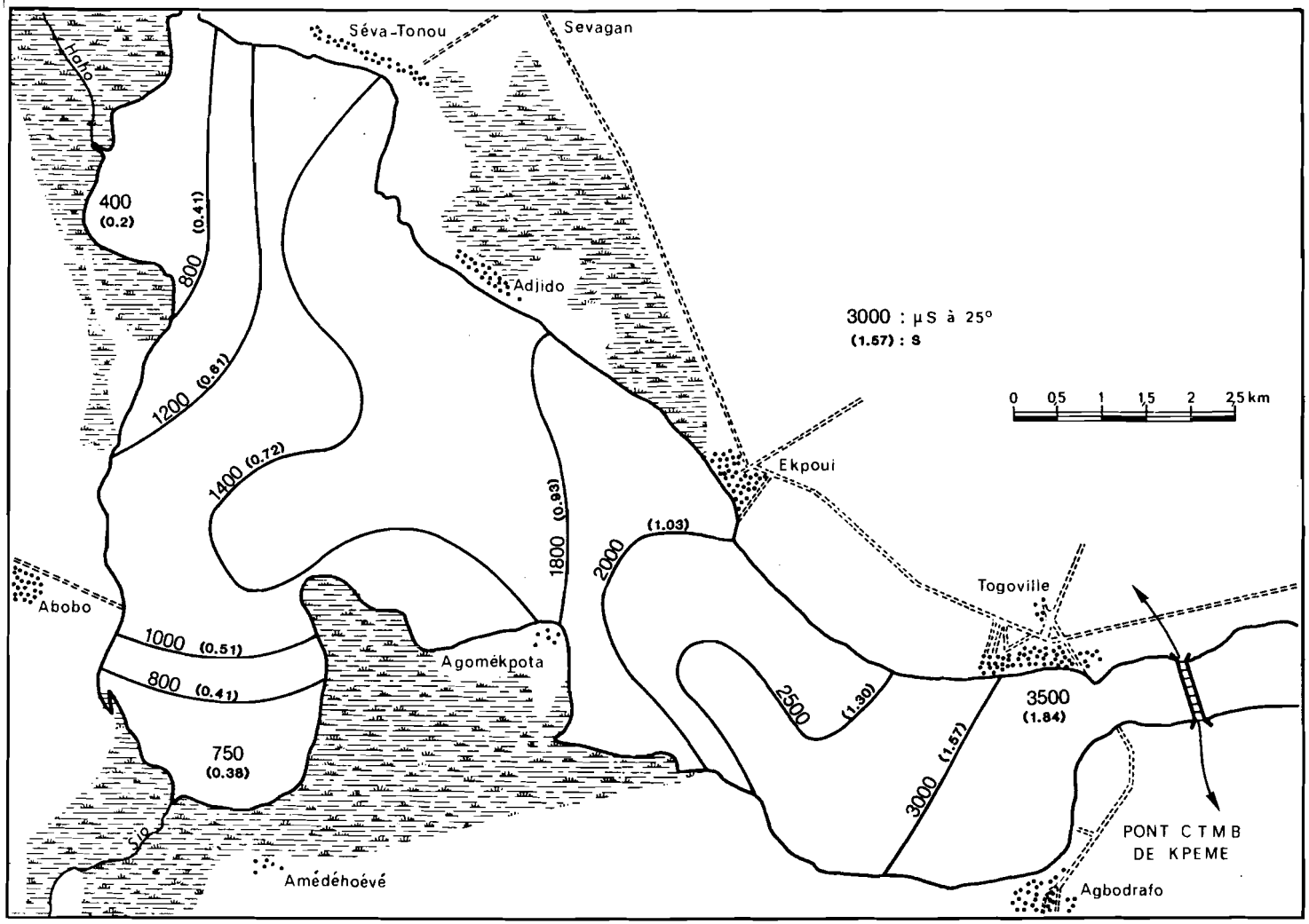


Fig-43 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 30 Juin 1982

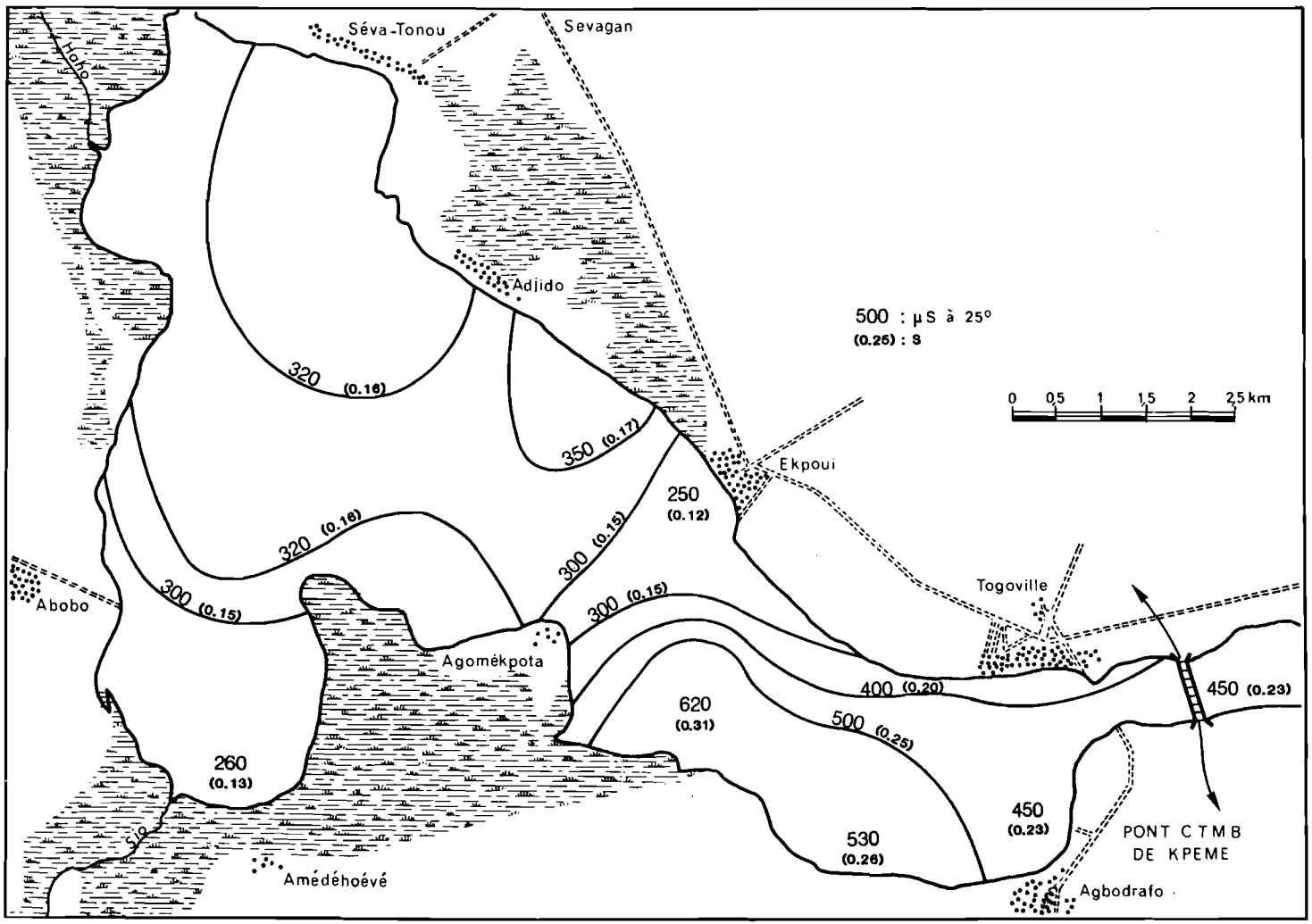


Fig-44 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 3 Août 1982

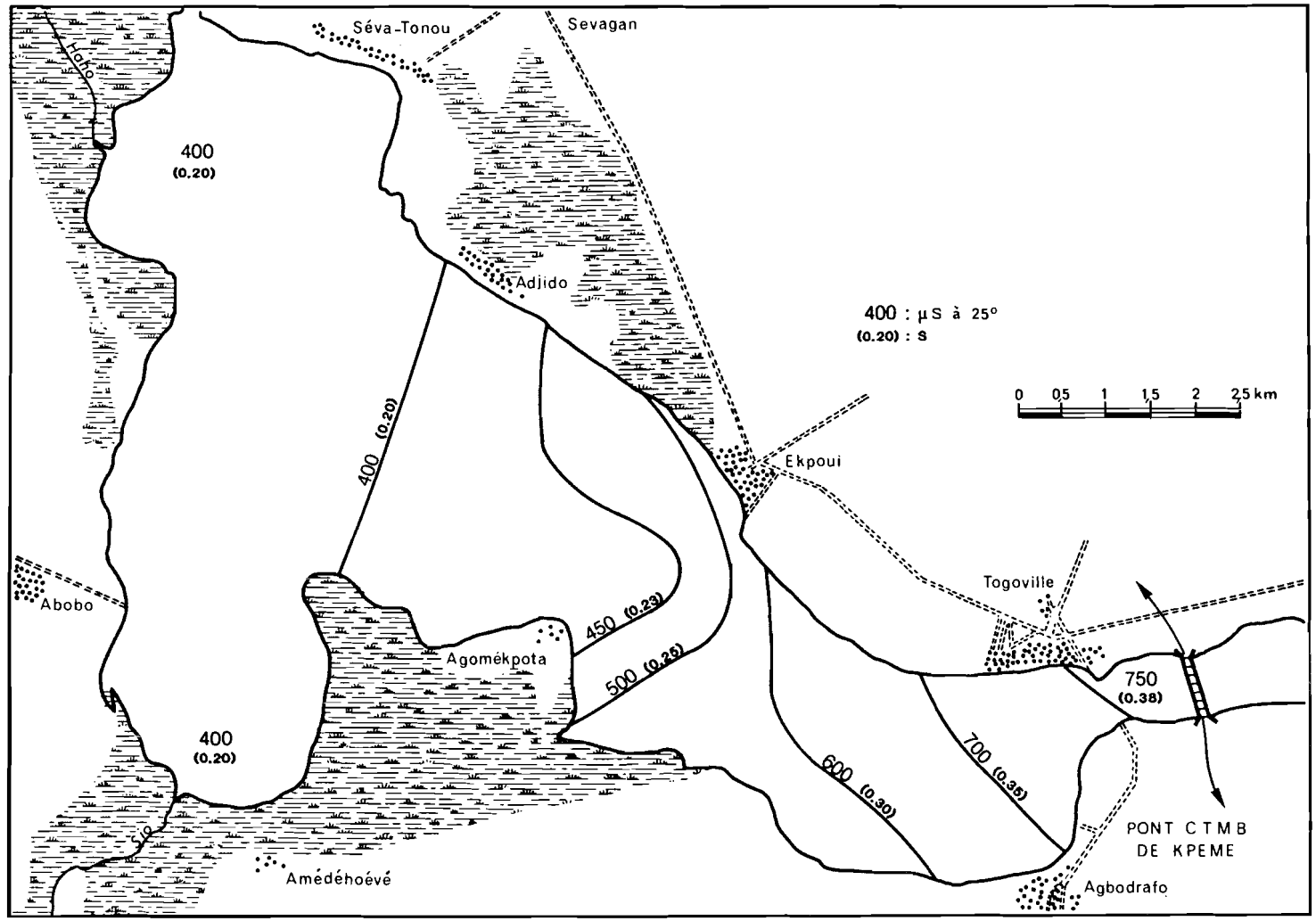


Fig-45 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 4 Octobre 1982

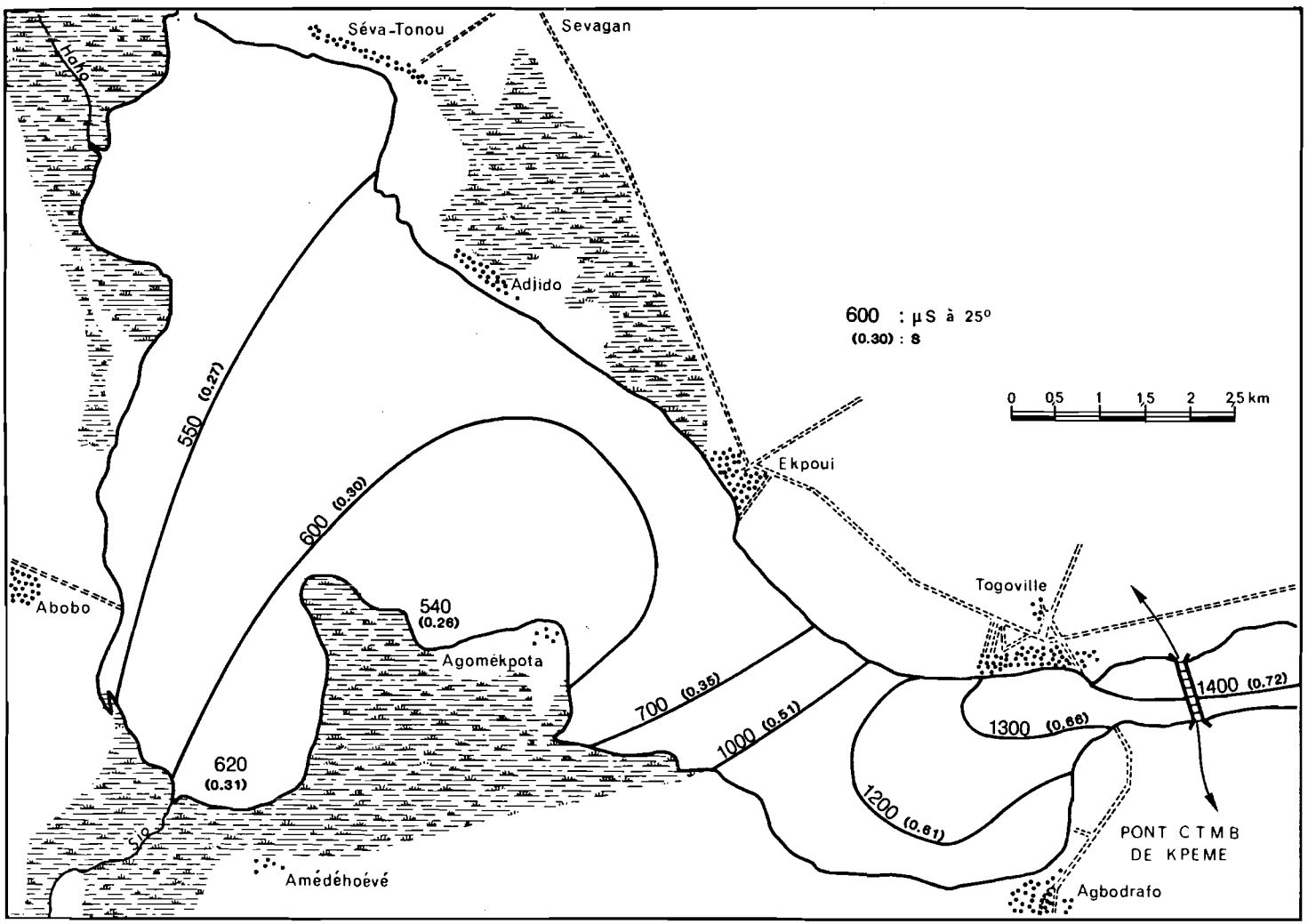


Fig-46 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 18 Novembre 1982

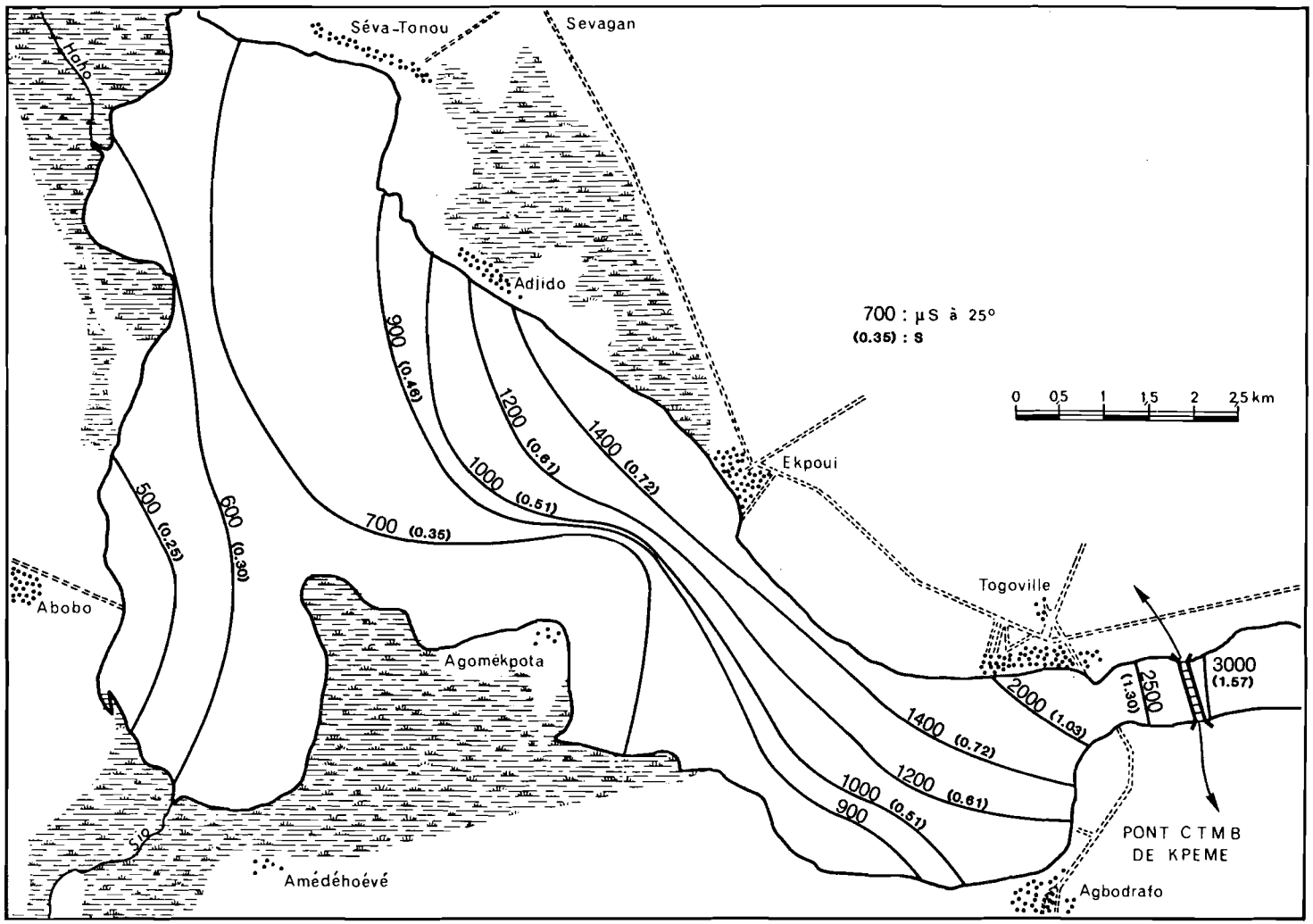


Fig-47 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 9 Décembre 1982

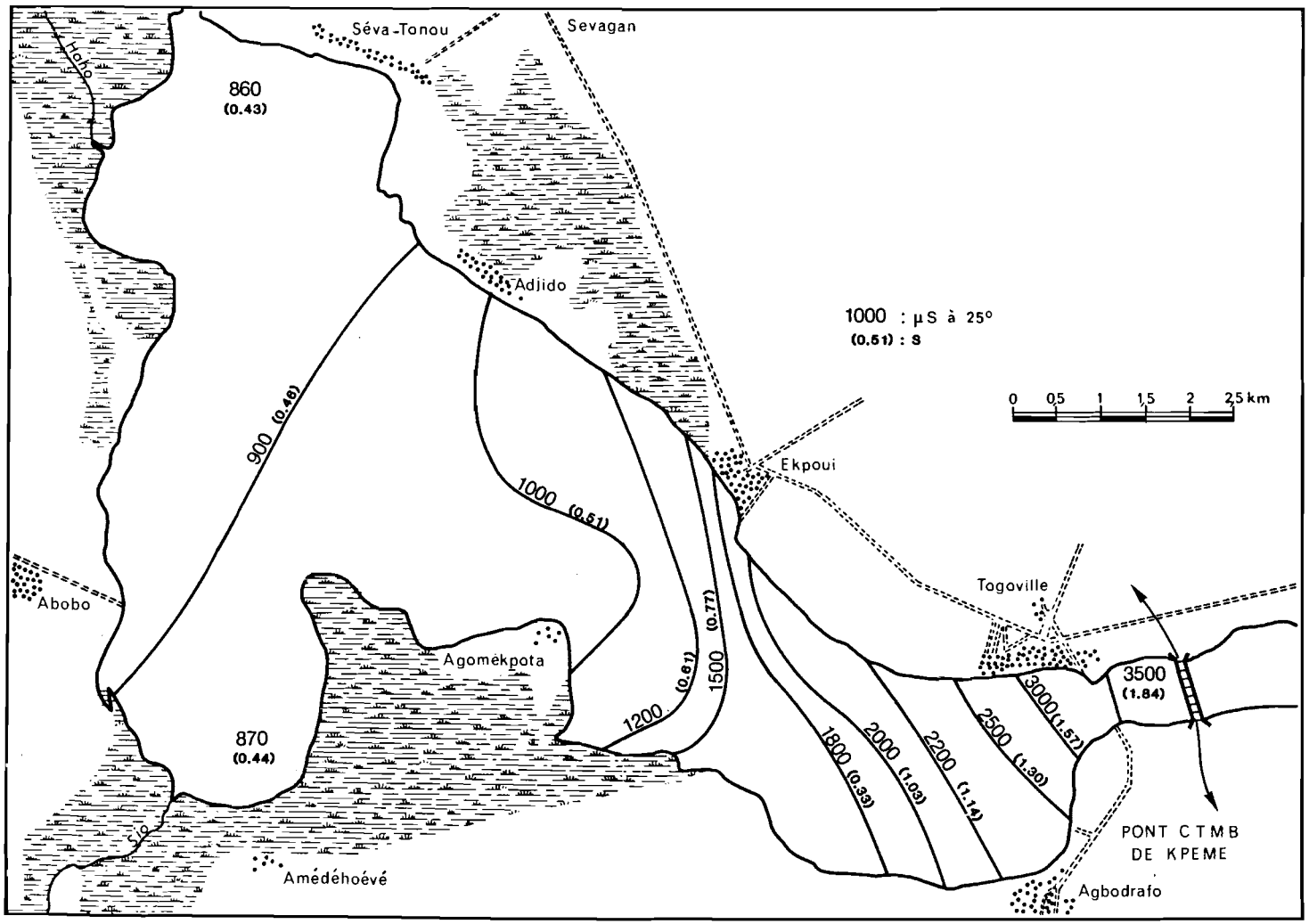


Fig-48 LAC TOGO COURBES D'ISOSALINITE Le 31 Décembre 1982

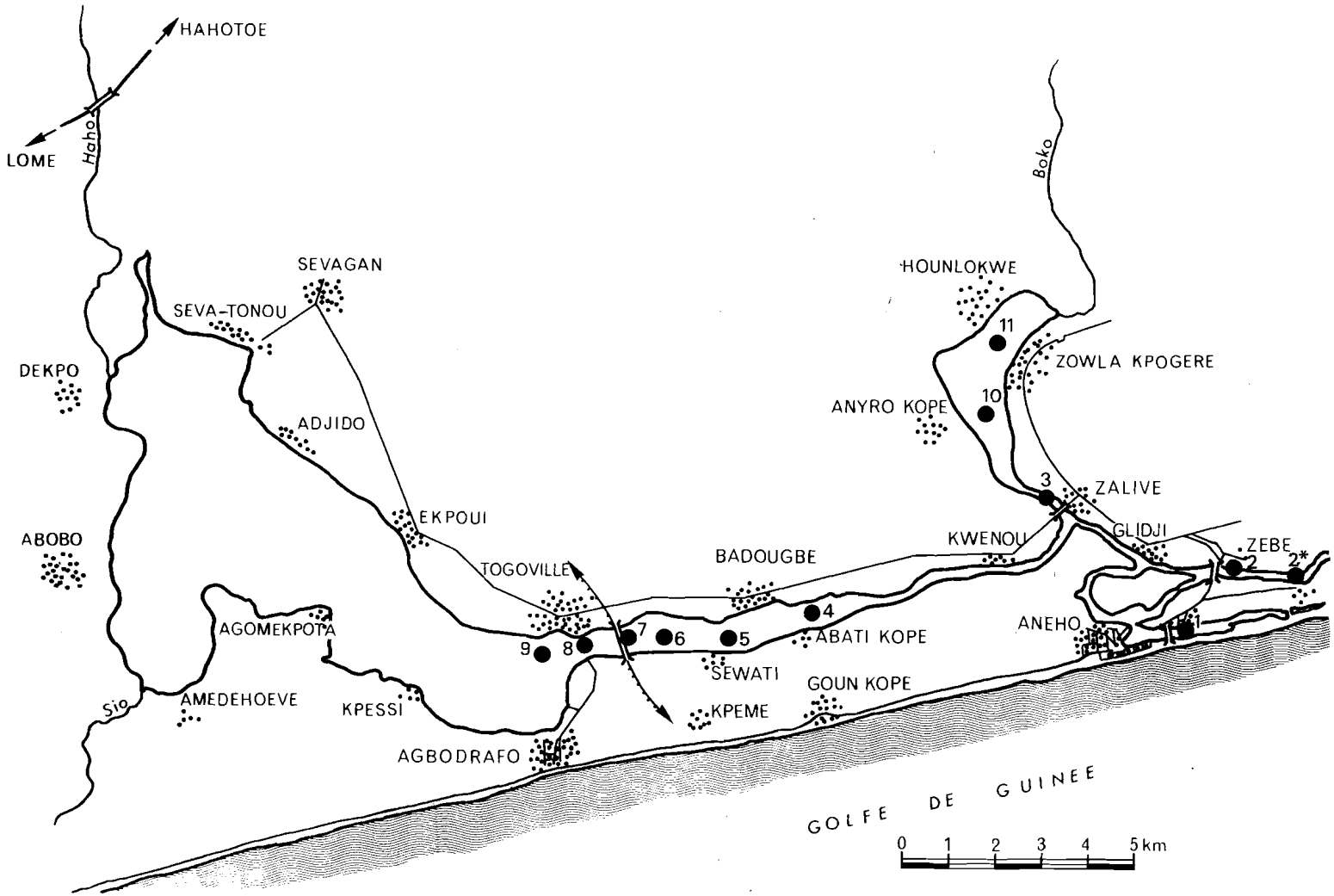


Fig-49 Etude du système lagunaire du TOGO Situation des points de contrôle de la qualité des eaux dans les chenaux lagunaires

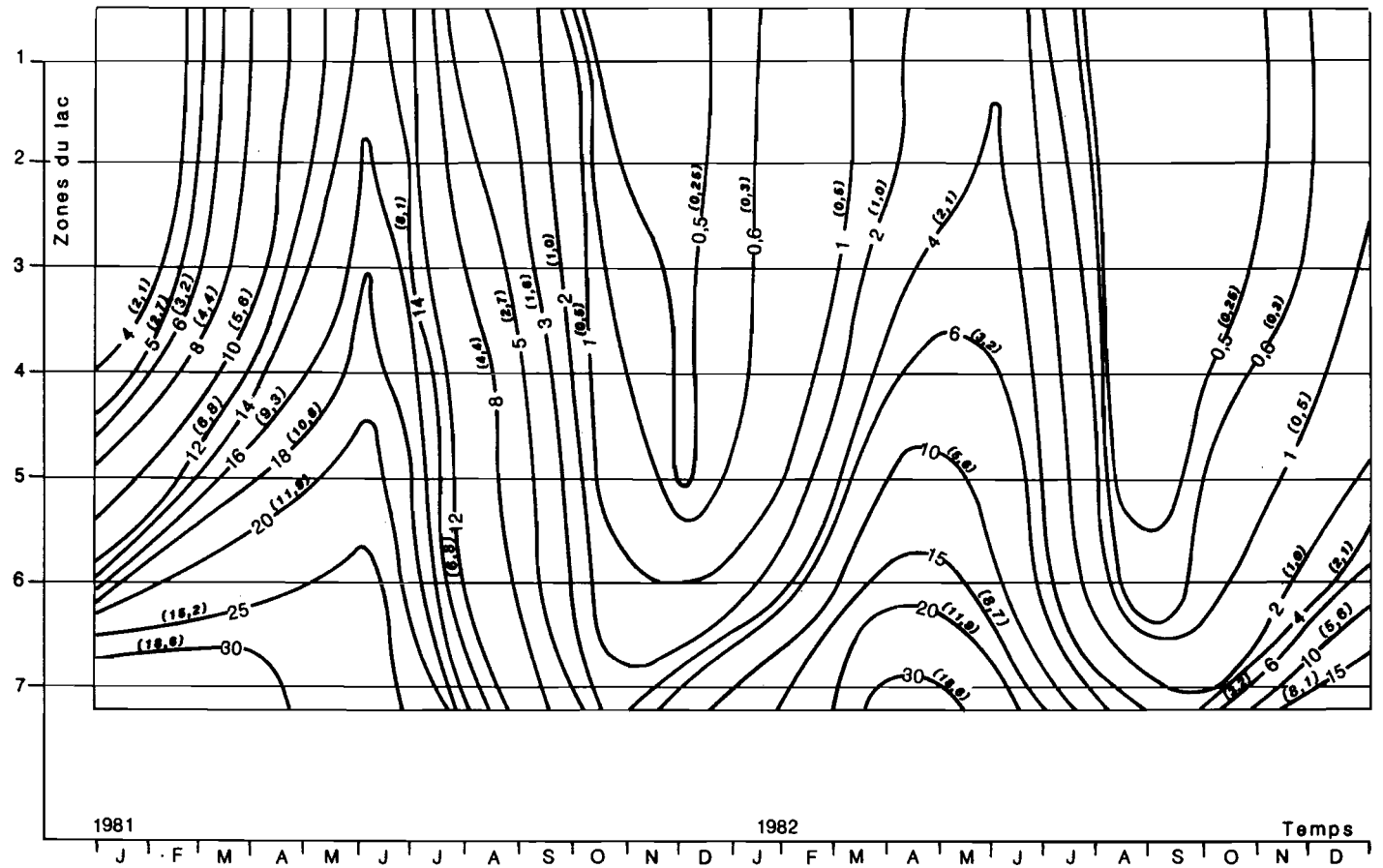
2.1.3 Diagramme spatiotemporel de salinité des eaux lagunaires (cf.Fig.50)

La conductivité apparaissant comme un excellent traceur de la salinité des eaux, il nous a semblé important de pouvoir suivre son évolution sur l'ensemble du plan d'eau lagunaire, et à tout moment de la période d'étude, sans discontinuité. Nous avons ainsi calculé à chaque série de prélèvement, les valeurs représentatives de la salinité des eaux pour chacune des zones préalablement définies sur les lagunes (cf. Fig. 6). Pour ce faire, nous avons planimétré les surfaces délimitées par les courbes d'isosalinité décrites précédemment (cf. § 2.1.1) et en avons déduit une valeur régionale, pondérée par la surface, en considérant la profondeur uniformément répartie sur l'ensemble du plan d'eau. Ces valeurs régionales ont été reportées sur un diagramme espace -temps qui présente toute la durée de la période d'étude en abcisse et les zones de 1 à 7 définies sur le Lac et les lagunes, en ordonnée. Ces valeurs ainsi reportées ont servi de support pour le tracé ultérieur des courbes de salinité présentées sur la Fig. 50, exprimée en valeur de salinité pratique (S) et de conductivité (µ S à 25°C).

L'étude d'un tel diagramme permet de suivre l'évolution qualitative de la salinité des eaux lagunaires dans l'espace et dans le temps, d'estimer les vitesses moyennes et le sens de la propagation de la salinité des eaux dans les lagunes, de comparer enfin l'évolution interannuelle de la salinité des eaux au cours de la période d'étude qui couvre deux étiages et demi et deux crues. Cet aspect dynamique de la propagation de la salinité et de la circulation des eaux lagunaires sera développé dans le chapitre suivant.

La salinité des eaux lagunaires au Togo, présente d'importantes variations saisonnières accompagnées principalement par de forts gradients d'étiage et d'importantes variations interannuelles sous l'effet des crues et de l'ouverture ou fermeture du cordon littoral à Aneho.

Le gradient de salinité croissant du nord ouest au sud est du plan d'eau lagunaire s'établit progressivement au cours de l'étiage et atteint son extension maximale au mois de mai dans le nord du Lac Togo, juste avant les premières précipitations.



10 = Conductivité (μS à 25°C x 10^{-3}) (5,6) = Salinité pratique

Fig-50 VARIATIONS SPATIO-TEMPORELLES DE LA SALINITE PRATIQUE S ET DE LA CONDUCTIVITE DES EAUX DU LAC TOGO

Le gradient maximal de salinité S entre l'embouchure des tributaires au nord du Lac Togo (zone 1), et le chenal lagunaire situé à l'est de Togoville (zone 6), varie de 8,1 à 15,2 (en salinité pratique) à la fin de l'étiage 1981 consécutif à l'ouverture du cordon littoral à Aneho en septembre 1980 et varie de 2,1 à 10 à la fin de l'étiage 1982, consécutif à la fermeture prolongée du système sur la mer. Les chenaux lagunaires à proximité du cordon littoral, à Aneho (zone 7), présentent une salinité maximale de 18,6, chaque année, indépendamment du régime d'ouverture. La vidange des eaux de crue provoque chaque année une homogénéisation de la salinité des eaux à des valeurs maximales de l'ordre de 0,25, sur l'ensemble du plan d'eau du Lac Togo proprement dit (zones 1 à 5) ; la salinité demeure un peu plus élevée à proximité d'Aneho (zone 7) et n'a pas été inférieure à 1,5 en octobre 1981, ni inférieure à 1,0 en septembre 1982.

Ces observations sont tout à fait comparables à celles effectuées par TEXIER et al. (1979-1980), sur le Lac Nokoué au Bénin, en fonction du régime des ouvertures et fermetures du chenal de Cotonou sur la mer : gradient de salinité croissant d'est en ouest de 7 à 22 °/oo en mars 1980 après l'ouverture du chenal de Cotonou en août 1979 et de 2 à 9 °/oo en mars 1979 en période de fermeture prolongée du chenal depuis avril 1978. D'autre part, les observations de la salinité au nord du Lac Togo ne sont pas incompatibles avec l'évolution saisonnière de la salinité des eaux en lagune Ebrié, en Côte d'Ivoire au niveau de l'embouchure de l'Agneby (à l'est de Dabou), en zone de transition entre les régions sous influence continentale dominante à l'ouest et océanique dominante à l'est vers Abidjan et au niveau de la lagune Potou soumise également à un régime d'influence mixte : maximum de salinité de 9 °/oo en février - mars, suivi d'une longue période dessalée (salinité inférieure à 1 °/oo) de juin à décembre (d'après PAGES et al., 1979).

2.1.4 Rapport de salinité

La méthode de détermination de la "salinité pratique" des eaux lagunaires, n'est valide que dans la mesure où ces eaux saumâtres proviennent d'une simple dilution d'eau de mer, sans que l'effet de mélange avec des eaux continentales n'en modifie trop la composition ionique initiale, ce qui peut se

concevoir pour les fortes salinité d'étiage rencontrées dans les zones aval des chenaux lagunaires, mais ne doit plus être vrai dans les zones amont très diluées à forte influence continentale.

Pour tenter de mettre en évidence une répartition spatiale de ces influences marines ou continentales, nous avons établi les rapports des valeurs de la salinité des eaux lagunaires, exprimées en gramme par kilo ($^{o}/oo$) de chlorure de sodium, sur les valeurs de la salinité pratique des eaux calculées à partir de la conductivité (cf. § 1.6.1.2).

Pour obtenir les valeurs de la salinité en $^{o}/oo$ de chlorure de sodium, nous avons repris les formules empiriques de corrélation entre conductivité et salinité en g/l de chlorure de sodium, (cf. § 1.6.1.2) et les valeurs de la densité de l'eau de mer, à température 20°C, pour une gamme de salinité de 0 à 35 et sous pression atmosphérique normale.

Salinité pratique	0	5	10	15	20	25	30	35
Densité	0,998	1,002	1,005	1,009	1,013	1,017	1,020	1,024

Tableau 20 : Densité de l'eau de mer en fonction de la salinité pratique, à T = 20°C et pression atmosphérique normale. (GAMBERONI, Muséum d'Hist. Nat ; comm. pers.).

La Fig. 51 présente les variations du rapport NaCl($^{o}/oo$)/S, pour une gamme de conductivité de 100 à 25000 µS à 25°C.

On notera, pour les fortes valeurs de conductivité, l'étalement progressif de la courbe se rapprochant de la valeur d'un rapport de 80 %, ce qui n'est pas en contradiction avec les résultats présentés par SVERDRUP et al. (1942) : 78 % et par MILLERO (1974) : 83 %, sur des eaux océaniques.

Cette correspondance, ainsi que la régularité du sommet de la courbe, permet de considérer un effet de dilution régulier de l'eau de mer en lagune jusqu'à des valeurs de salinité assez faibles, comprises entre 0,4 et 1 $^{o}/oo$, à partir desquelles, l'influence continentale devient dominante, ce qui se traduit sur la courbe par une nette rupture de pente au niveau de la gamme de salinité 0,4 - 1 $^{o}/oo$.

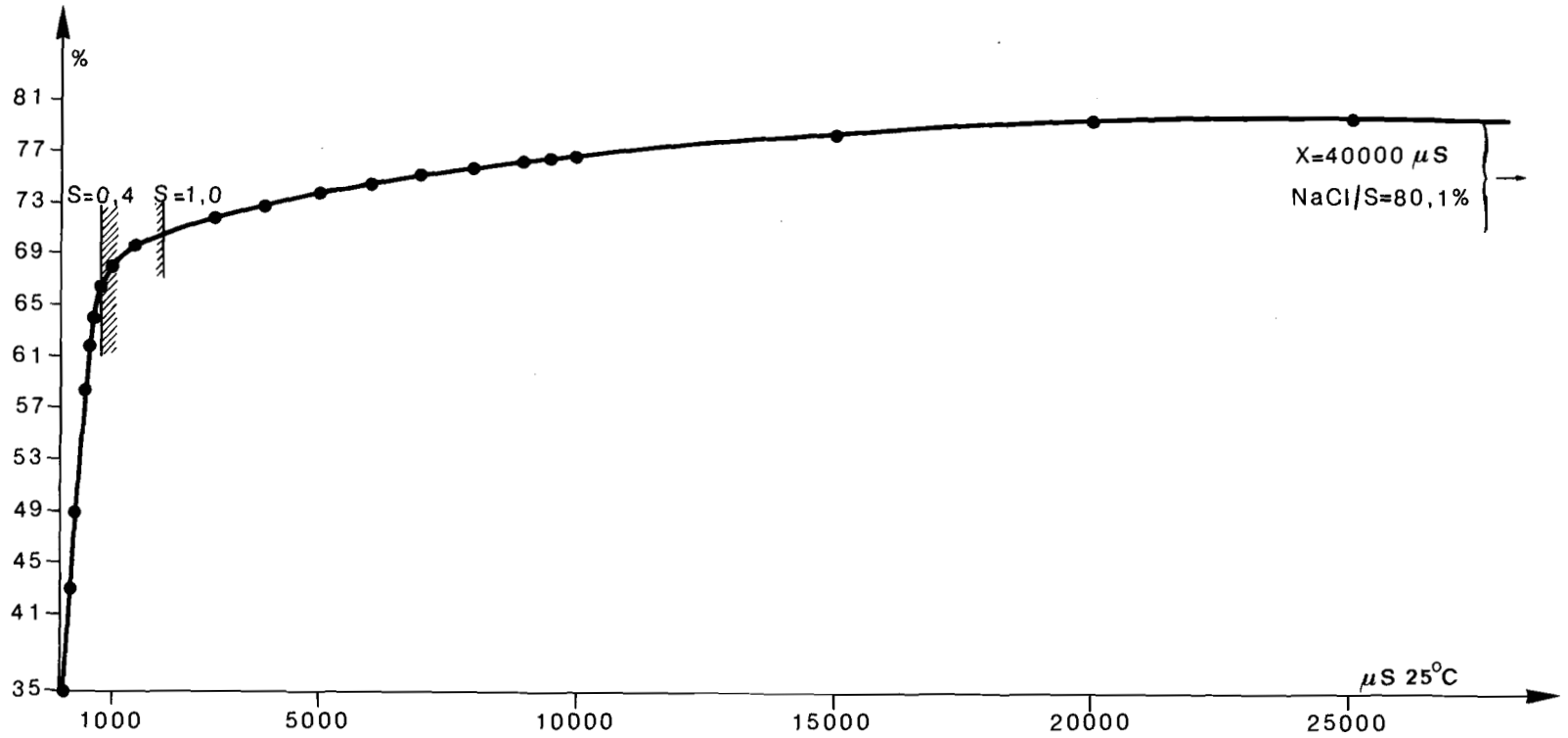


Fig-51 VARIATIONS (%) DU RAPPORT DE SALINITE NaCl/S (°/oo) EN FONCTION DE LA CONDUCTIVITE (µS à 25°C) DES EAUX LAGUNAIRES

Ces résultats, qui tendent à confirmer une nette influence des eaux marines jusque dans la partie la plus amont du système lagunaire, au cours de chaque période d'étiage (cf. Fig. 23 à 48) et une nette dominance des eaux continentales de crue sur l'ensemble du plan d'eau du Lac Togo dès le début de la saison humide, devront être confrontés à l'étude des rapports ioniques. Tout raisonnement en terme de salinité S °/oo des eaux lagunaires se trouverait par conséquent limité à des valeurs supérieures à 1 °/oo , les eaux moins chargées ne pouvant être décrites qu'en terme de conductivité.

2.2 Variations saisonnières et spatiales de quelques teneurs ioniques

Le tableau 21 suivant présente pour chacune des zones définies sur les lagunes (cf. Fig. 6), ainsi que pour le Sio et le Haho, les variations saisonnières des teneurs en ions sodium, potassium, calcium, magnésium ainsi que de l'alcalinité des eaux (TAC) exprimées en milligramme par litre.

	1981								1982										
DATE	24 FEV.	31 MARS	26 MAI	25 JUIN	24 JUIL	08 SEP.	14 OCT.	01 DEC	26 JAN	24 FEV	31 MARS	29 AVR.	27 MAI	30 JUIN	03 AOU	04 OCT	18 NOV	09 DEC	31 DEC
SIO																			
Na^+	-	-	-	-	-	-	6,4	8,5	9,0	9,0	10	20	30	19	9,9	7,6	6	31	30
K^+	-	-	-	-	-	-	13	1,9	5,5	7,0	8,2	12	22	2,7	3,1	2,3	3,5	2,7	-
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	7,8	11	14	11	-	-	12	12
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	5,2	-	5,6	3,6	14	-
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,5	11,5	-	-	-	-	-	10,6	-	-	28
TAC	-	-	-	-	-	-	-	62	73	104	72	61	58	53	69	74	63	58	52
HAHO																			
Na^+	-	-	-	-	8,3	-	10	11	17	16	30	20	20	11	13	9,9	10	16	30
K^+	-	-	-	-	16	-	2,7	3,1	3,5	3,9	6,2	9,0	7,8	2,7	3,1	3,1	7,0	4,3	-
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	10	13	22	-	21	14
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,8	5,9	7,0	8,7	5,5	12	18
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25	-	-	-	-	-	10,6	-	-	31
TAC	-	-	-	-	161	-	-	69	67	128	58	71	51	57	80	75	99	104	106
1 A																			
Na^+	810	1800	2600	2300	480	190	65	58	90	110	210	440	480	170	34	47	90	89	90
K^+	25	34	85	67	23	17	6,0	5,1	5,5	7,8	13	27	97	34	4,7	5,1	6,6	7,4	7,8
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	33	36	11	13	11	-	24	19
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,5	74	75	22	9,2	11	12,6	24	22
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	410	670	940	310	-	88	-	-	188
TAC	99	95	76	56	57	65	-	77	96	113	122	115	87	50	60	85	107	109	116
1 B																			
Na^+	900	1500	2900	3000	870	150	14	29	90	106	210	540	570	105	25	43	68	83	92
K^+	31	52	94	98	37	15	2,9	2,3	6,2	7,4	15	26	110	32	4,8	4,7	6,2	7	7,4
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	40	39	12	12	11	-	21	17
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,8	80	115	19	11	11	12	18	23
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	405	920	1110	190	-	84	-	-	177
TAC	97	94	73	53	53	61	-	65	91	110	115	111	89	59	62	76	103	105	105
2																			
Na^+	850	1600	2800	2600	920	320	49	51	93	108	240	540	610	200	33	44	70	106	109
K^+	33	54	96	92	38	17	4,5	4,2	5,0	7,7	15	24	120	41	4,7	4,9	6,4	7,6	7,8
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	39	44	17	13	11	-	20	19
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,8	-	120	31	12	11	12	20	24
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	202	-	-	-	-	-	-	-	-	184
TAC	96	94	83	58	55	62	-	69	93	111	115	114	92	58	60	-	108	111	115
3																			
Na^+	860		3200	2900	1200	330	61	55	98	105	430	690	760		31	47	69	114	128
K^+	39	63	115	93	49	20	6,0	5,3	5,8	7,7	32	36	150	48	4,8	5,2	6,6	7,7	8,5
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27	47	50	16	11	12	-	21	20
Mg^{2+}	-		-	-	-	-	-	-	-	-	6,1	150	-	41	9,4	12	13	27	30
Cl^-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	740	1200	1500		-	92	-	-	229
TAC	96	93	87	59	55	62	-	75	96	110	115	112	96	59	59	95	105	110	116

Tableau 21 :

Variations saisonnières et spatiales de quelques teneurs ioniques des eaux lagunaires (mg/l).

	1981								1982										
DATE	24 FEV.	31 MARS	26 MAI	25 JUIN	24 JUIL	08 SEP.	14 OCT.	01 DEC	26 JAN	24 FEV	31 MARS	29 AVR.	27 MAI	30 JUIN	03 AOU	04 OCT	18 NOV	09 DEC	31 DEC
4																			
Na^+	1500	2400	3400	3100	1800	560	79	56	100	160	870	1200	940	330	40	58	77	142	153
K^+	56	75	120	110	71	25	5,8	5,3	6,9	9,7	39	52	-	65	5,6	5,7	7,8	8,8	9,7
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	72	-	24	12	13	-	24	23
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15	150	170	49	11	13	14	28	37
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1600	2200	1850	690	-	107	-	-	415
TAC	97	94	86	62	57	61	-	75	95	107	113	109	93	64	59	83	104	111	117
5																			
Na^+	2550	3400	4000	3600	1950	670	114	56	107	430	1850	1900	1400	510	55	96	180	196	303
K^+	89	113	130	120	74	29	7,7	5,3	7,4	18	79	90	-	79	6,1	6,7	8,5	10	14
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	83	-	-	30	13	14	-	32	31
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	290	-	250	71	13	17	16	44	59
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3300	3500	2600	820	-	127	-	-	461
TAC	100	97	83	70	57	61	-	74	96	104	106	103	93	71	59	83	105	112	120
6	18 MARS																		
Na^+	4800		5800	3800	2100	750	-	-	370	1300	2200	2900	1900	620	57	164	336	512	945
K^+	170		200	132	80	33	-	-	17	53	185	-	-	91	6,0	7,6	13	22	39
Ca^{2+}	-		-	-	-	-	-	-	-	-	120	-	-	34	13	14	-	65	69
Mg^{2+}	-		-	-	-	-	-	-	-	-	420	-	325	86	17	22	34	128	196
Cl^-	-		-	-	-	-	-	-	-	-	4000	5300	3500	1100	-	188	-	-	2100
TAC	96		86	69	56	66	-	-	96	98	106	105	88	76	60	86	111	118	130
7																			
Na^+	7100	-	6000	5000	2800	1200	550	750	2500	3000	5800	5600	4000	1050	180	320	2300	3000	3900
K^+	280	220	280	170	107	50	23	34	66	120	230	280	155	105	7,7	15	130	145	-
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	220	-	185	51	21	29	-	220	-
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	900	-	690	145	32	58	270	530	-
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10500	10000	7400	1800	-	585	-	-	-
TAC	115	100	90	77	63	66	-	99	97	107	110	101	88	81	67	97	130	135	136
8																			
Na^+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	810	480	105	140	300	800	800	600
K^+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32	58	4,5	5,1	13	-	20	20
Ca^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	91	71	22	30	-	-	145	84
Mg^{2+}	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	110	84	15	27	-	100	170	125
Cl^-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1250
TAC	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	130	80	61	79	135	150	135	120

Ces teneurs ioniques sont des concentrations moyennes établies pour chacune des zones définies sur les lagunes (cf. Fig. 6), à chaque campagne de prélèvement et à partir du réseau de point de surveillance (cf. Fig. 5). En ce qui concerne la lagune d'Aneho (zone 7), qui offre un milieu très hétérogène quant aux profondeurs, nous avons établi les teneurs moyennes de chacun des paramètres, à la profondeur constante de 2 mètres d'eau. Ces valeurs moyennes, en raison du faible degré de précision des analyses, devront être considérées avant tout, comme un moyen de caractériser les différents types d'eau mis en présence dans les lagunes, ainsi que leurs importantes évolutions saisonnières.

Il ressort d'une façon générale de ces valeurs, l'homogénéisation spatiale de la qualité des eaux lagunaires à la période des crues, suivie de la rapide augmentation de la charge saline des eaux à l'étiage, marquée par le fort contraste entre les parties nord et sud du Lac, le passage de la zone 4 à la zone 5 étant toujours accompagné d'une très forte décroissance de la charge ionique en solution.

Le sodium, varie dans le Lac Togo considérablement dans l'espace et dans le temps, entre la teneur minimale de 14 mg/l rencontrée dans le nord du Lac au mois d'octobre 1981, au maximum de crue, et la teneur maximale de 4000 mg/l rencontrée dans le sud du Lac au mois de mai 1981, à l'étiage minimal qui a suivi l'ouverture du système sur la mer. La teneur en sodium atteint 30 mg/l dans les eaux des tributaires en période d'étiage ; elle atteint 6000 mg/l et 5800 mg/l dans la lagune d'Aneho au cours de l'étiage minimal respectivement en mai 1981 et en mars 1982, ce qui confère à ces eaux lagunaires d'étiage, un caractère nettement saumâtre au sens strict (salinité supérieure à 5).

Le potassium, varie dans le Lac Togo entre la teneur minimale de 2,3 mg/l dans le nord du Lac en décembre 1981 et la teneur maximale de 130 mg/l rencontrée dans le sud du Lac en mai 1981. La teneur en potassium atteint 22 mg/l dans le Sio, en mai 1982 et 280 mg/l dans la lagune d'Aneho au cours de l'étiage minimal en mai 1981 et en avril 1982.

Le calcium, varie dans le Lac Togo entre la teneur minimale de 11 mg/l rencontrée à l'embouchure du Sio à la période de crue en juin 1982 et la teneur maximale de 83 mg/l rencontrée dans le sud du Lac en mars 1982, ce qui confère aux eaux du Lac Togo, un caractère relativement peu calcique. La teneur en calcium est toujours inférieure à 14 mg/l dans le Sio et le Haho, ce qui caractérise bien des eaux d'écoulement sur substrat cristallin et atteint 220 mg/l dans la lagune d'Aneho en mars 1982 ce qui révèle une importante influence marine dans cette zone.

Le magnésium, varie dans le Lac Togo entre la teneur minimale de 9 mg/l en août 1982 à l'embouchure du Sio à la période de crue et la teneur maximale de 290 mg/l rencontrée dans le sud du Lac en mars 1982. La teneur en magnésium atteint 17 mg/l dans le Sio, en avril 1982, ce qui est assez élevé et 900 mg/l dans la lagune d'Aneho en mars 1982. On remarquera la dominance croissante des teneurs en magnésium par rapport aux teneurs en calcium au fur et à mesure que l'on se rapproche de la lagune d'Aneho en 1982, ce qui soulignerait encore le caractère nettement saumâtre de cette zone littorale.

Le chlorure, atteint dans le Lac Togo la valeur maximale de 940 mg/l dans le nord du Lac en mai 1982, 3500 mg/l dans le sud du Lac en avril 1982, et 10500 mg/l dans la lagune d'Aneho dès le mois de mars 1982. Ces valeurs très élevées précisent à nouveau le caractère saumâtre des eaux lagunaires, au cours de la période stable de l'étiage 1982. En outre on notera qu'au cours de la période d'observation, ces teneurs en chlorure se présentent majorées de 75 à 80 % par rapport aux teneurs en sodium en période d'étiage, ce qui rappelle la proportion de ces deux ions dans l'eau de mer (SVERDRUP et al., 1942).

L'alcalinité définie par le titre alcalimétrique complet (TAC) et exprimée en mg/l de bicarbonate (HCO_3^-), dose essentiellement la teneur en anion bicarbonate qui est dominant pour les valeurs de pH rencontrées, mais dose aussi les anions carbonates (CO_3^{--}) ainsi qu'une partie des phosphates, des silicates et de l'ammoniaque libre présents en solution (NISBET et VERNEAUX, 1970). Ces variations du TAC, peuvent être ainsi très sensiblement rapprochées de celle d'un degré de minéralisation.

Les valeurs du TAC ont une amplitude de variation assez faible dans les eaux du Lac Togo, entre la teneur minimale de 50 mg/l HCO_3^- au mois de juin 1982 devant l'embouchure du Sio, jusqu'à la teneur maximale de 115 mg/l HCO_3^- rencontrée en février 1982 en plein étiage jusque dans le centre du Lac. Les

valeurs du TAC atteignent 104 mg/l HCO_3^- dans le Sio en février 1982 et 161 mg/l HCO_3^- en juillet 1981 dans le Haho.

On remarquera la grande homogénéité spatiale de ce paramètre sur l'ensemble du plan d'eau du Lac et des lagunes, à chaque saison.

L'azote : les quelques tentatives qui ont été effectuées avec la collaboration de la Direction des Productions Animales, à l'aide d'une trousse de terrain HACH, à proximité de la station d'Agbodrafo, les 28 juillet et 4 septembre 1981, ont révélé des teneurs en nitrate respectivement de 8,8 mg/l et 13,2 mg/l, des teneurs en ion ammonium respectivement de 0,58 mg/l et de 0,48 mg/l et des teneurs en nitrite de 66 µg/l.

Le phosphore : les quelques dosages qui ont été effectués entre les mois de mai et juillet 1981, ont révélé des teneurs en orthophosphate élevées, voisines de 0,2 mg/l, réparties de façon assez homogène sur le Lac et les lagunes, mais on observe à proximité de l'embouchure du Haho, des teneurs atteignant 0,3 mg/l, les 3 juin et 24 juillet 1981, lors de la reprise de l'écoulement des eaux.

Ces teneurs en azote et phosphore ne sauraient être l'objet d'aucune interprétation en raison de leur caractère trop instantané et localisé, mais elles sont assez fortes, par rapport à celles rencontrées habituellement dans les eaux naturelles, et tout particulièrement en ce qui concerne les teneurs en orthophosphate ; celles-ci pourraient s'expliquer par la présence à proximité du nord du Lac, des champs d'exploitation à ciel ouvert d'un minerai riche en phosphate et seraient susceptibles de faire l'objet d'une étude systématique approfondie.

2.3 Variations saisonnières et spatiales de quelques rapports ioniques

Pour tenter de préciser qualitativement l'évolution spatio-temporelle de l'équilibre entre les influences marines et continentales sur la composition chimique des eaux lagunaires, nous avons calculé, pour chacun des ions majeurs analysés (x) la valeur (Rx) définie comme le rapport entre la teneur de l'ion x mesurée dans les eaux lagunaires, ramenée à la chlorinité des eaux lagunaires et la valeur de ce même ion dans l'eau de mer ramenée à la chlorinité de l'eau de mer :

$$Rx = \frac{(x)a}{(Cl)a} \cdot \frac{(Cl)b}{(x)b}$$

a : indiquant une teneur définie en lagune

b : indiquant une teneur définie pour l'eau de mer

(in : MEDHIOUB, 1979).

Une valeur de Rx supérieure à 1 correspond à un enrichissement de l'eau lagunaire en ion x considéré, par rapport à la composition de l'eau de mer et une valeur inférieure à 1 correspond à un déficit.

La composition chimique de l'eau de mer a été choisi d'après SVERDRUP et al. (1942) (in EMERY, 1969), en coïncidence avec les valeurs présentées par RILEY et al (1967).

Les figures 52-A, -B, -C, et -D représentent respectivement les variations du rapport Rx établi pour le sodium, le potassium, le calcium et le titre alcalimétrique complet (TAC), sur l'ensemble du plan d'eau lagunaire pour les mois de mars, avril, mai, juin, octobre et décembre 1982, en période de fermeture prolongée du cordon littoral. Les figures 53 - A et B représentent respectivement les variations du rapport du titre alcalimétrique complet sur le potassium et du calcium sur le sodium, ramené chacun à la valeur du même rapport établi pour l'eau de mer.

Il ressort de l'étude de ces 6 diagrammes les quelques remarques suivantes :

* fortes valeurs des rapports Rx dans les eaux des tributaires, pouvant provenir d'un déficit de ces eaux continentales en chlorure par rapport aux cations majeurs.

On notera le brusque réajustement de la composition ionique des eaux dès leur entrée en lagune (zone 1), marqué par un rapprochement vers la composition de l'eau de mer.

* similitude des variations du titre alcalimétrique et du calcium (Fig. 52-C, et D), qui présentent, en période d'étiage, une composition voisine de celle de l'eau de mer dans la partie aval de la lagune (zones 5 - 6 et 7), avec un léger enrichissement en amont et qui présentent, en période de crue,

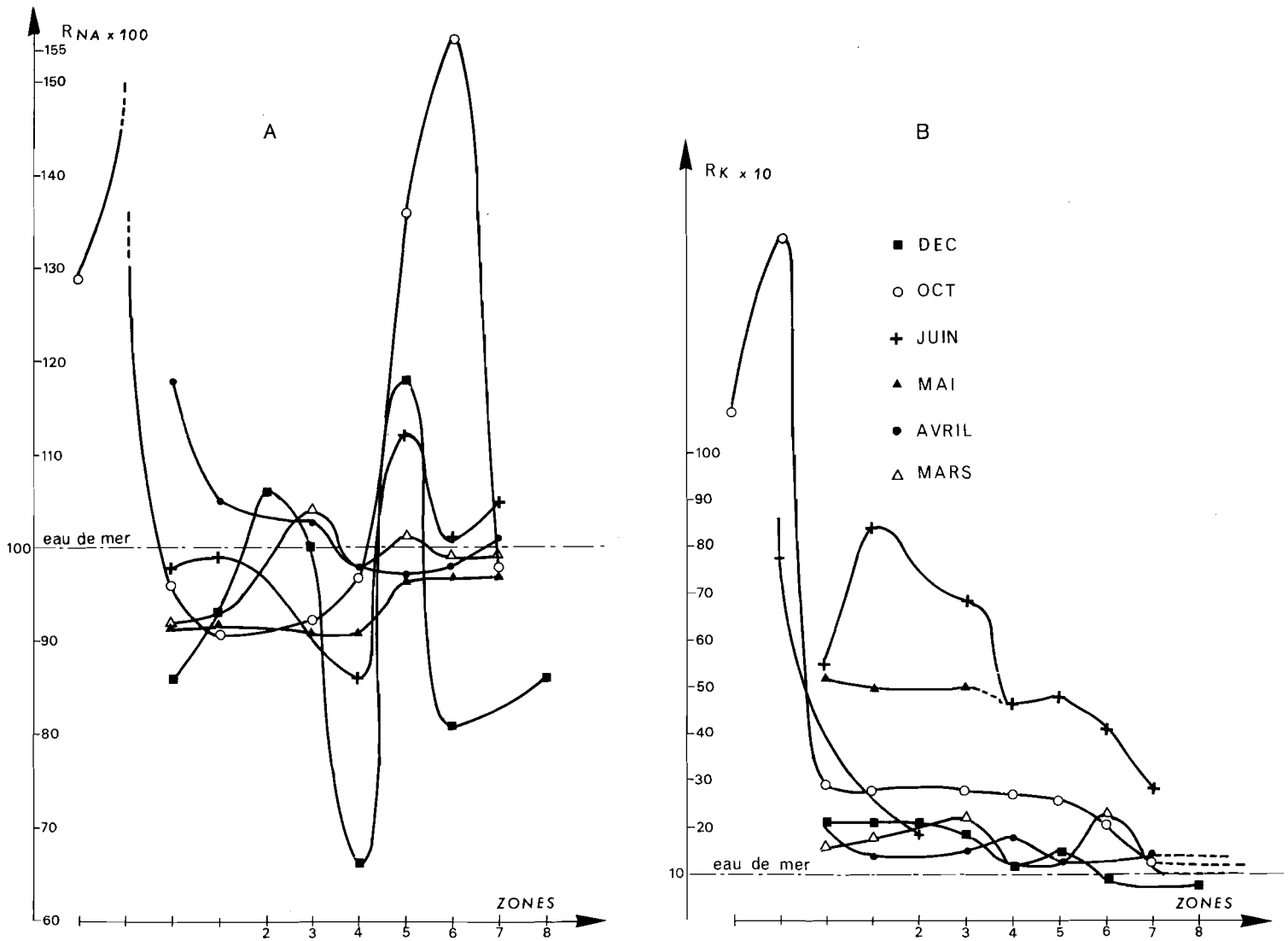


Fig-52 A et B VARIATIONS SPATIALES ET SAISONNIERES DES RAPPORTS R_{Na} et R_K

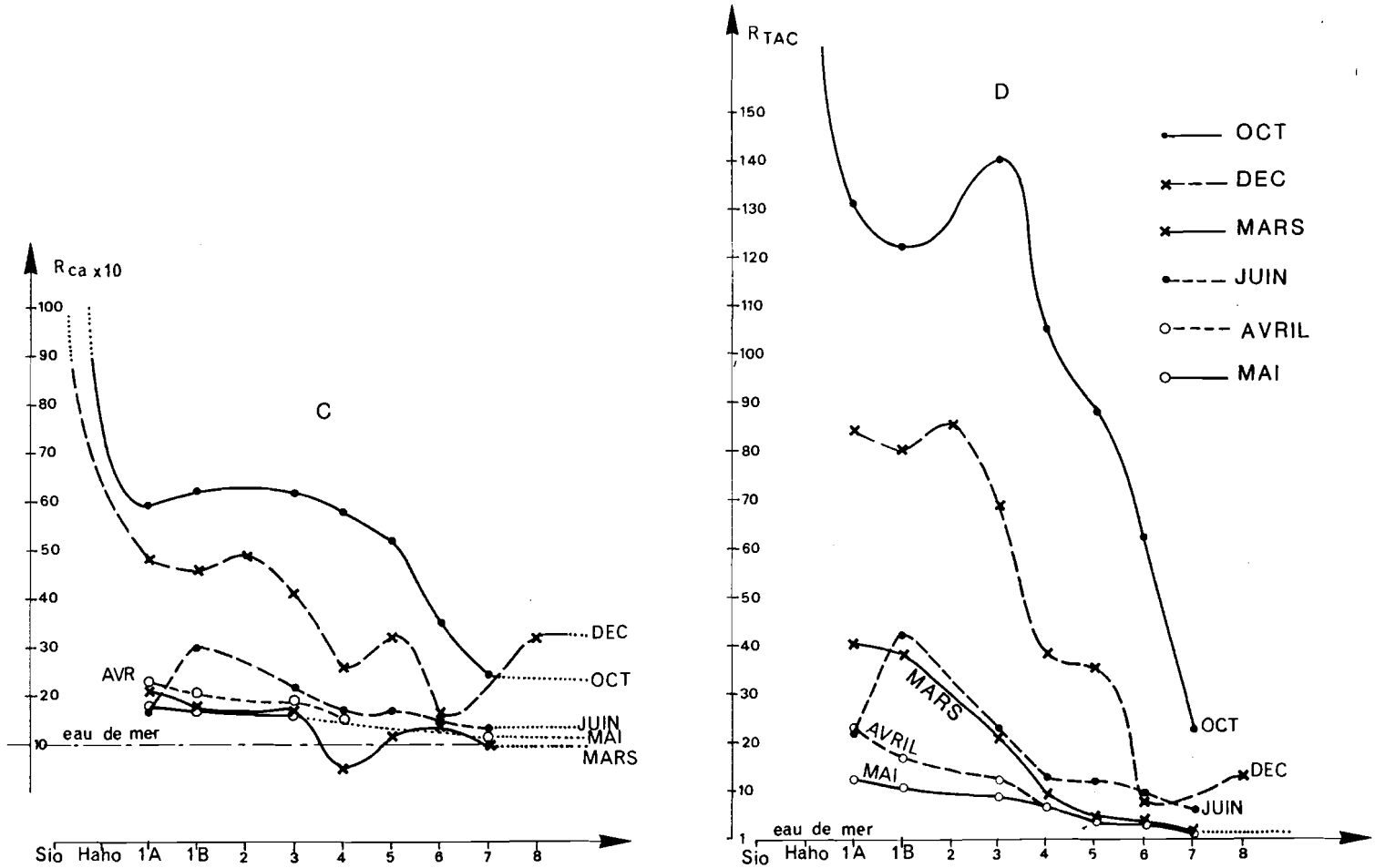


Fig-52 C et D VARIATIONS SPATIALES ET SAISONNIERES DES RAPPORTS R_{ca} ET R_{TAC}

un enrichissement très important par rapport à l'eau de mer selon une polarité croissante de l'aval vers l'amont très marquée, traduisant l'origine nettement continentale de ces ions. Bien que ces deux diagrammes présentent une évolution comparable, il apparaît que le titre alcalimétrique complet soit un meilleur traceur de l'influence des eaux continentales en lagune et plus particulièrement des eaux d'écoulement des tributaires avec les caractéristiques suivantes (cf. Fig. 52-D) :

- enrichissement par rapport aux eaux marines, en permanence.
- fort gradient d'enrichissement orienté de façon croissante d'aval vers l'amont, en permanence.
- enrichissement des eaux lagunaires amont très précoce à partir de juin et très rapide jusqu'en octobre, avant le réajustement progressif d'étiage vers une composition plus proche de celle de l'eau de mer.
- régularité des courbes de variations du rapport R_{TAC}.

* le potassium apparaît également comme un traceur d'une influence continentale mais plus globalement que le TAC ou le calcium, avec la marque d'apports terrigène et météorique probables, intervenant très tôt dès le mois de mai, assez brutalement sur l'ensemble du plan d'eau, suivis rapidement par un réajustement vers la composition de l'eau de mer. Les gradients d'enrichissement des eaux, croissants d'aval vers l'amont sont plus faibles que pour le calcium et le TAC (cf.Fig. 52-B).

* influence très nette d'eaux marines progressant à travers le plan d'eau lagunaire d'aval vers l'amont à partir de la fin de la période de crue et provoquant un enrichissement des eaux lagunaires en chlorure, ce qui est traduit par le réajustement progressif au cours de l'étiage des rapports Rx des ions traceurs d'une influence continentale (K, Ca, HCO_3^-), vers une valeur proche de 1, avec de fortes amplitudes saisonnières en ce qui concerne les zones lagunaires amont, plus continentales.

En 1982, l'influence des eaux salées atteint la zone 6 à partir du mois de décembre seulement, ce qui se traduit par une nette réduction des rapports Rx du potassium, du calcium et du TAC, pour les zones 6 et 7 entre octobre et décembre (cf. Fig. 52 B - C et D).

* léger déficit des eaux lagunaires en sodium par rapport à l'eau de mer surtout en mai et décembre mais on notera un net enrichissement des eaux

lagunaires dans les zones aval 5 et 6, en début d'étiage (octobre - décembre 1982), en coïncidence avec la reprise de l'influence des eaux saumâtres dans cette région. Cet accroissement pourrait être dû à un apport couplé d'origine marine et continentale dans cette région lagunaire aval, à partir des eaux lagunaires saumâtres qui s'écoulent en provenance du Bénin et qui serait enrichie en sodium en début d'étiage par l'effet des eaux continentales de crue du Bénin (Mono), avant un réajustement à une composition voisine de celle de l'eau de mer, au cours de l'étiage (cf. Fig. 52 A).

* baisses régionales des teneurs en calcium et de l'alcalinité, simultanément observées dans les zones 1B (embouchure du Sio dans le Lac Togo) et 4 (centre du Lac Togo), à partir de l'évolution des rapports Rx (cf. Fig. 52 C et D) et des rapports HCO_3^-/K^+ et Ca^{2+}/Na^+ (cf. Fig. 53 A et B). La coïncidence régionale de ces évolutions simultanées de rapports différents, laisserait présumer d'une légère précipitation de calcite au débouché des eaux continentales en amont du système lagunaire, au niveau des zones centrales et sud ouest du Lac Togo, abritées. La confirmation de cette hypothèse nécessiterait l'étude fine de la composition ionique saisonnière des eaux du Lac Togo accompagnée d'une étude sédimentologique régionale. Les figures 53 A et B présentent en outre, l'influence dans la partie aval du système lagunaire (en zone 8), des eaux continentales de ruissellement du Boko, enrichie en calcium et bicarbonate.

2.4 Faciès des eaux lagunaires

Il ressort de l'étude de ces quelques paramètres chimiques, que les eaux du système lagunaire du Togo sont de type chlorurée-sodique à forte teneur magnésienne, cette tendance ne faisant que s'accentuer du nord vers le sud, où les eaux de la lagune d'Aneho sont fortement saumâtre au sens strict, au cours de chaque période d'étiage.

Le tableau 22 présente l'évolution au cours de la période d'étude, du faciès des eaux lagunaires au Togo, en reprenant la classification établie d'après la salinité des eaux (KIENER, 1978).

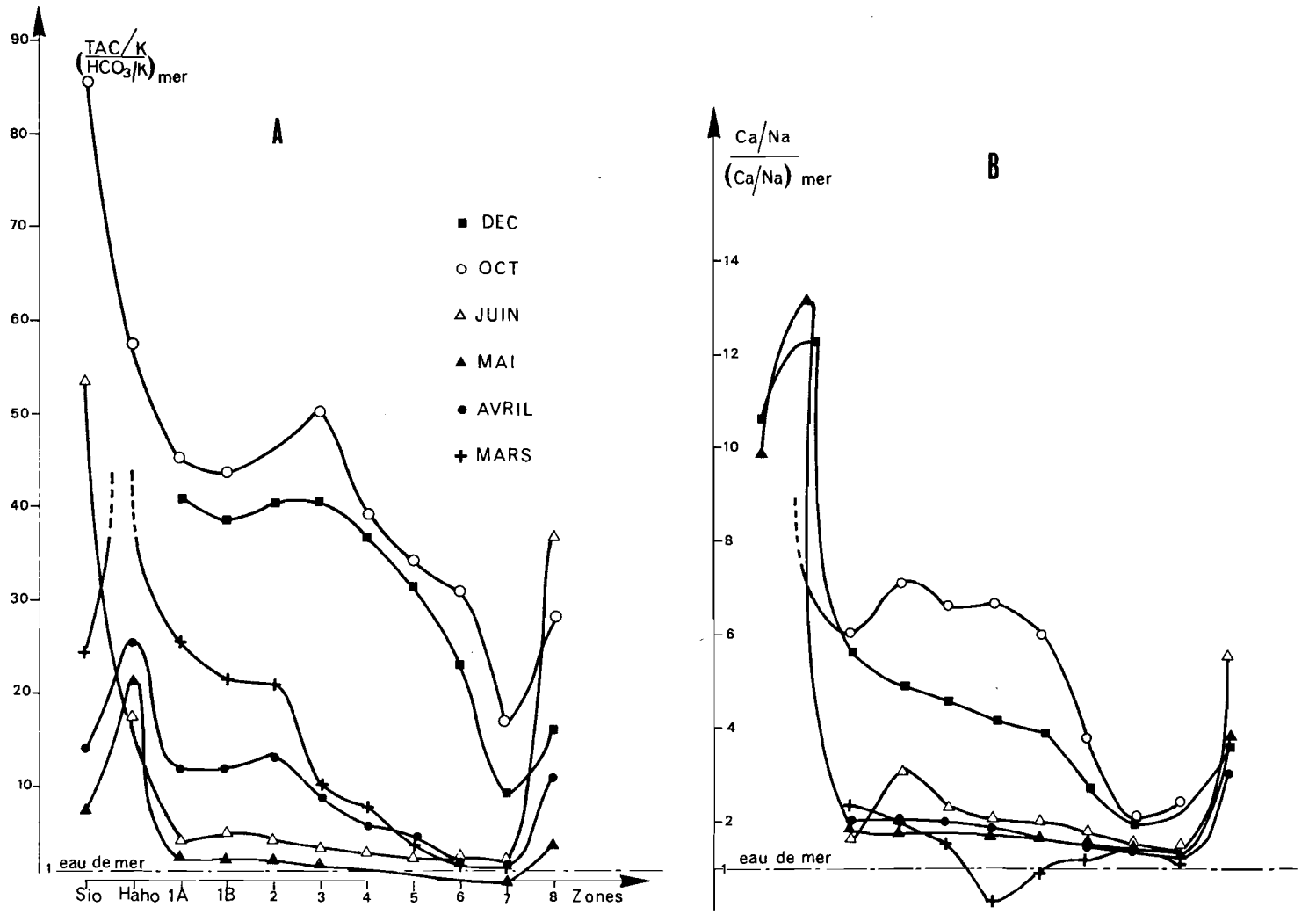


Fig-53 A et B VARIATIONS SPATIALES ET SAISONNIERES EN LAGUNE DES RAPPORTS TAC/K ET Ca/Na PAR RAPPORT A LA COMPOSITION DE L'EAU DE MER

	1981												1982											
DATE / ZONE	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1		βo	αo		βm		αo		βo			d					βo					d		
2		βo	αo		βm		αo		βo			d					βo					d		
3		βo	αo	βm	αm	βm	αo		βo			d					βo					d		βo
4	βo	αo	βm		αm		βm	αo	βo			d		βo		αo			βo			d		βo
5			βm		αm		βm	αo	βo			d		βo	αo	βm	αo		βo		d		βo	
6			αm				βm	αo	βo		d		βo	αo	βm	αm	βm	αo	βo	d			βo	αo
7			p		αm		βm	αo	βo	αo			βm	αm		p	αm	βm	αo		βo		αo	βm

Tableau 22 : Variations du faciès des eaux lagunaires

d	= eaux douces	S < 0,5
βo	= eaux β mixo-oligohalines	S de 0,5 à 3
αo	= eaux α mixo-oligohalines	S de 3 à 5
βm	= eaux β mixo-mésohalines	S de 5 à 10
αm	= eaux α mixo-mésohalines	S de 10 à 18
p	= eaux mixo-polyhalines	S de 18 à 30

Dans l'ensemble, les eaux du système lagunaire, en dehors d'une période de dessalure (eau "douce") après les crues, constituent un milieu mixohalin (S de 0,5 à 30). On remarque que les lagunes d'Aneho (zone 7), de Togoville (zone 6) et le sud du Lac Togo (zone 5), présentent des eaux polytypiques pouvant devenir mixo-mésohalines à chaque période d'étiage, indépendamment de l'ouverture du système sur la mer à Aneho. Par contre, le reste du Lac Togo (zones 4 - 3 - 2 et 1) ne présente un milieu polytypique qu'au cours de l'étiage 1981, consécutif à l'ouverture du système sur la mer et présente un milieu mixo-oligohalin monotypique au cours de l'étiage 1982. On notera la présence d'eau saumâtre (milieu mixo-mésohalin) sur l'ensemble du système lagunaire au cours de l'étiage 81.

Il apparaît que les eaux lagunaires présentent au Togo une variabilité de faciès beaucoup plus large que sur un vaste plan d'eau lagunaire tel que le Lac Nokoué au Bénin et ceci chaque année indépendamment du régime d'ouverture sur la mer, ce qui n'est pas le cas du Lac Nokoué aux étiages 1979 et 1980 (TEXIER et al., 1980).

2.5 Apports dissous au Lac Togo

A partir du dosage de l'ion sodium effectué régulièrement sur les eaux du Sio et du Haho depuis le mois d'octobre 1981, et de l'estimation mensuelle des volumes écoulés à l'embouchure de ces deux tributaires dans le Lac Togo, nous avons calculé un ordre de grandeur de la masse de sodium déversée mensuellement dans le Lac Togo ss. par chacun de ses tributaires. Ces valeurs, exprimées en tonnes de NaCl sont reportées dans le tableau 23.

	1981		1982							
DATE	OCT.	DEC.	JAN.	FEV.	MARS	AVR.	MAI	JUIN	AOUT	OCT.
SIO	606	44	36	32	60	98	349	723	162	89
HAHO	802	44	103	0	0	9	273	762	67	23
TOTAL	1408	88	139	32	60	107	622	1485	229	112

Tableau 23 : Valeurs mensuelles des apports salin (NaCl) dissous au Lac Togo, par ses tributaires (en tonnes).

2.6 Variations saisonnières et spatiales du stock salin des lagunes

Afin de suivre l'évolution de la salinité dans les lagunes, sans aucune perturbation due aux phénomènes de variation de volume d'eau, nous avons calculé les stocks salins exprimés en milliers de tonnes de chlorure de sodium dissous, de chacune des zones définies sur le lagunes (cf. Fig. 6) et pour chaque quinzaine de la période d'étude comprise entre janvier 1981 et décembre 1982. Les valeurs du stock salin ont été déterminées à partir de l'estimation de la teneur moyenne en chlorure de sodium de chaque zone établie d'après le diagramme spatio-temporel de salinité (cf. Fig. 50), de l'estimation du volume de chaque zone établi d'après le planimétrage des cartes IGN au 1/50 000è et de la profondeur moyenne de chaque zone calculée d'après les relevés des hauteurs d'eau aux échelles de Kpémé. Pour les 5 zones définies sur le Lac Togo, proprement dit, nous avons considéré la profondeur moyenne du Lac, uniformément répartie et calculée à partir de la formule suivante :

si P est la profondeur moyenne du Lac Togo

et H la hauteur d'eau lue à la station de Kpémé

$$P = H + 0,392 \quad \text{(en mètre).}$$

Pour la lagune de Togoville (zone 6), nous avons calculé la profondeur moyenne à partir des profils en travers effectués sur la lagune (cf. Fig. 16) et des lectures de hauteurs d'eau à la station de Kpémé.

$$P = H + 0,35 \quad \text{(en mètre).}$$

Pour la lagune d'Aneho (zone 7), nous avons calculé la profondeur moyenne à partir du profil en travers effectué à Zalivé, de quelques sondages effectués à Zébé, à Aneho, ainsi que dans le bras lagunaire qui s'étend à l'ouest de la zone 7 vers Togoville et des lectures de hauteurs d'eau aux stations de Kpémé (Hk) et de Zalivé (Hz).

$$P = 0,26\ Hk + 0,39\ (Hz + 1,50) + 0,35\ (Hz + 3,30) \quad \text{(en mètre).}$$

Les Fig. 54 et 55 présentent pour chaque zone, les diagrammes d'évolution saisonnière du stock salin, exprimé en milliers de tonnes de chlorure de sodium, dont les valeurs sont regroupées dans le tableau 24.

ZONES	1		2		3		4		5		6		7	
DATES	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b	a	b
JAN. 1981	1,7	1,8	3,1	3,3	2,0	6,3	5,5	10,8	20,6	28,8	28,6	35,9	92,8	108
FEV.	8,7	14,3	15,9	27,6	15,7	22,2	17,9	21,7	39,8	47,6	44,5	49	118	111
MARS	19,5	25	37	48,8	28,1	36,1	26,7	31	56,5	66	55,1	59,8	106	102
AVRIL	30,1	35,5	59,1	70,3	41,6	51	38,1	44,5	75,4	80	64	66	94,6	91,5
MAI	45,3	54,5	91,5	108,7	65	77,7	54,9	61,2	85,7	88,9	70,5	76	89,2	86
JUIN	60,1	58	123	116	91,8	85	65,2	63	93,7	90	81,2	60,5	83,9	80
JUIL.	42,5	18	97,5	56	70,2	50,5	56,5	50	76,5	64,5	52	46	71	57
AOUT	16	14	47,5	36	41	30	41,5	29	48,5	41,8	36	32	47	41,5
SEP.	12	10,5	27	23	17	15,5	18	14	29	23	20	18	32	24,5
OCT.	5	2	12,2	5	8	3	7	3	13	5	10	6	15	8,5
NOV.	1,5	1,4	3,5	2,5	3	2,5	1,8	1,2	2,7	2	4	3,1	13	16,5
DEC.	0,5	0,4	3	3,2	1,5	2	1	1,2	1	1,8	2,2	3	22	27
JAN. 1982	1,60	1,82	2,92	3,50	2,00	2,18	1,40	1,57	1,92	2,22	4,83	6,0	32,2	39
FEV.	2,0	2,25	3,84	4,37	2,53	3,0	2,22	2,73	4,36	7,5	9,0	17,3	48	56,4
MARS	3,42	4,32	6,23	9,44	5,12	10,4	7,03	14,2	20,2	35,5	29,6	39,7	72,9	95
AVRIL	6,84	9,4	14	20,2	14,8	16,4	18,6	19,7	44	43	45	45	102	99,5
MAI	11,8	13,4	24,8	27,7	19,6	22,7	20,9	21,2	41,5	38,1	41,6	39,8	89,1	77,7
JUIN	10,5	8,7	24	21	22	18	19,8	16	30	23,4	31	26	67,5	58
JUIL.	5	3	13,4	7,2	11,5	4,5	8,4	4,2	15,5	7	18,5	10,5	40,8	30,5
AOUT	1,3	1,2	2,7	2,4	1,8	1,7	1,7	1,3	2,5	2,1	2,2	1,9	14	8,6
SEP.	1,2	1,2	2,3	2,3	1,6	1,6	1,4	1,4	2,2	2,2	1,6	2,0	6,2	5,2
OCT.	1,3	1,4	2,3	2,6	1,6	1,8	1,4	1,5	2,6	3,2	2,5	3,4	5,6	18,5
NOV.	1,5	1,7	2,8	3,2	1,8	2,4	1,6	1,9	3,7	4,2	4,2	6,1	29,2	42,6
DEC.	1,9	2,5	3,7	4,7	3,5	4,4	2,4	3,2	4,4	6,5	9,0	14,3	47,5	52,9

Tableau 24 : Evolution saisonnière des stocks salins régionaux, en milliers de tonnes de chlorure de sodium, sur l'ensemble du plan d'eau lagunaire.

a et b représentent respectivement les valeurs moyennes de la première et deuxième quinzaine de chaque mois.

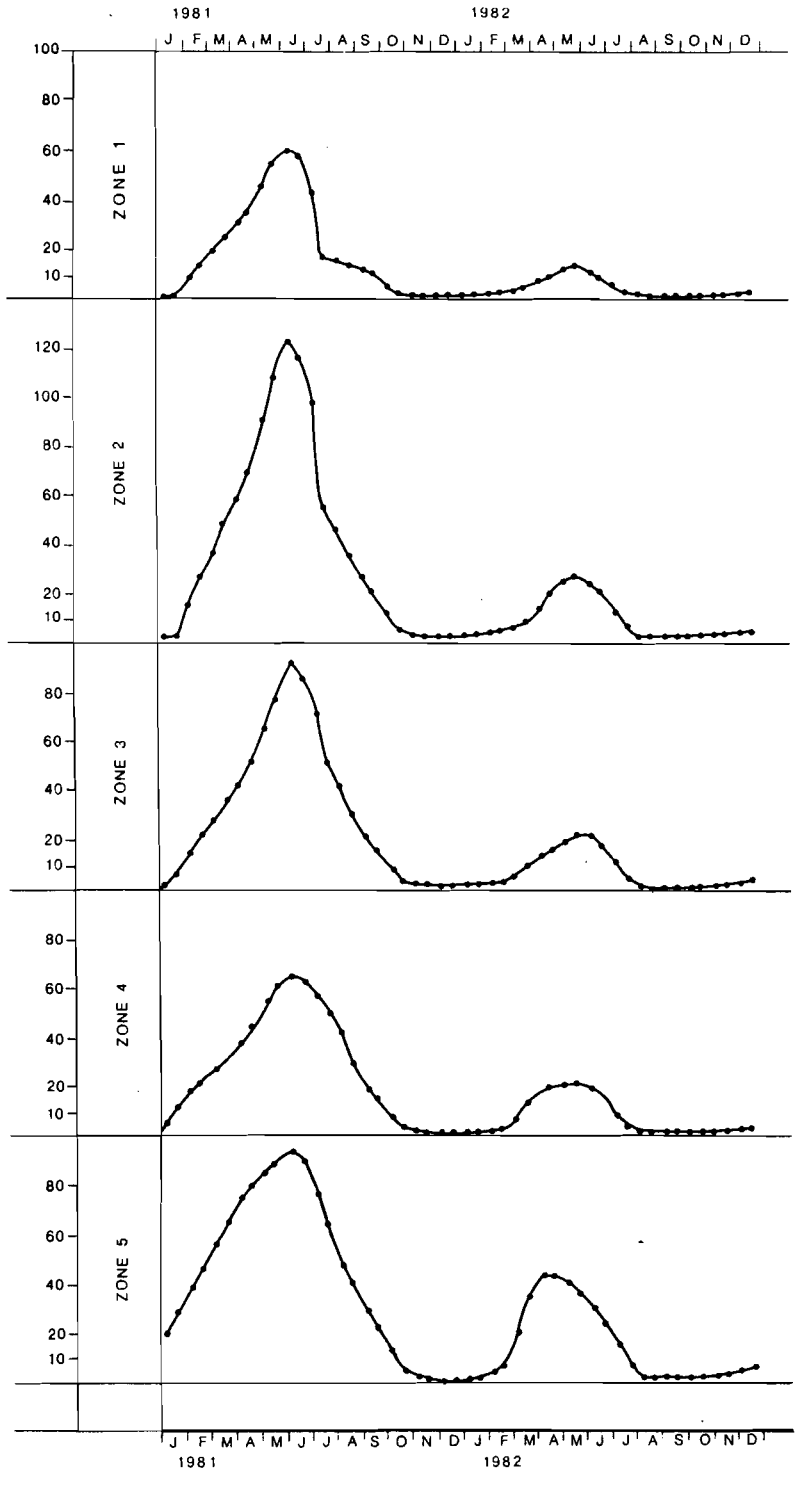


Fig-54 EVOLUTIONS SAISONNIERES ET REGIONALES DES STOCKS SALINS DU LAC TOGO (10^3 tonnes NaCl)

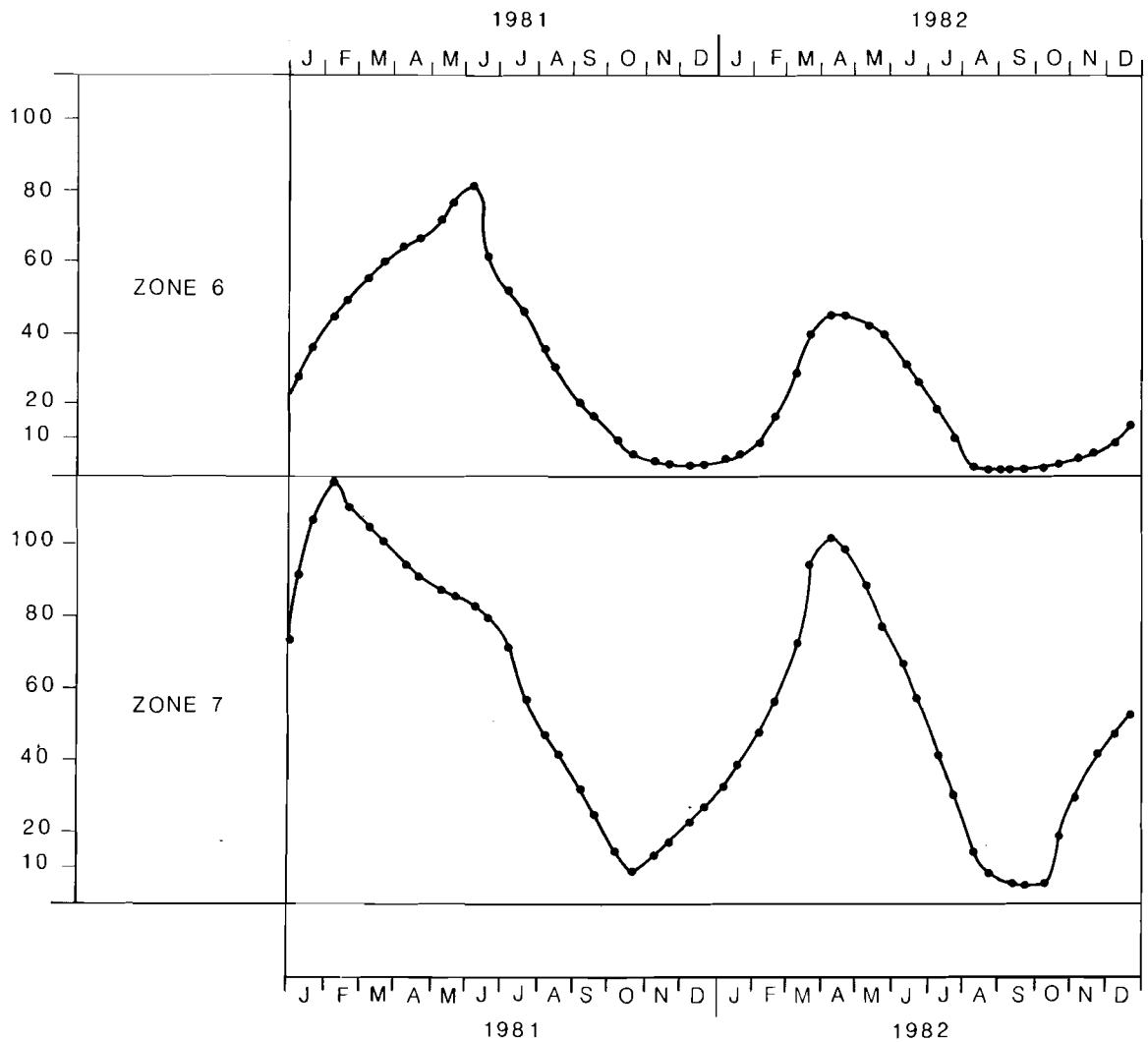


Fig-55 EVOLUTIONS SAISONNIERES ET REGIONALES DES STOCKS SALINS DES CHENAUX LAGUNAIRES (10^3 tonnes NaCl)

On remarquera :
- l'augmentation très importante des stocks salins au cours des périodes d'étiage (décembre à mai) .
- l'impact de la pénétration des eaux marines en comparant les pics d'étiages en 1981 et 1982 ;
- l'impact des eaux de crue, marqué par la précocité de la remontée des stocks salins au début de l'étiage 1982-83, relative au déficit de la petite saison de crue en octobre 1982 ;
- la simultanéité avec laquelle les stocks salins évoluent dans le Lac Togo (zones 1 à 5) et le chenal de Togoville (zone 6), ainsi que le décalage de 4 mois du pic maximum dans les chenaux d'Aneho (zone 7), au cours de l'étiage 1981.

CHAPITRE V

DYNAMIQUE DES EAUX DU SYSTEME LAGUNAIRE

1 - CARACTERISTIQUES DU MOUVEMENT DES EAUX DANS LE LAC TOGO

1.1 Facteurs de mise en circulation des eaux

Outre les mouvements localisés d'écoulement saisonnier des eaux liés à celui des tributaires (ch. III § 3.1), un plan d'eau naturel tel que le Lac Togo proprement dit, est le siège d'un certain nombre de mouvements d'eau, d'une part sous l'action directe du vent, entretenant un brassage mécanique des eaux variable selon les régions ainsi que la formation de courants linéaires assez localisés et surtout sensibles en surface et d'autre part sous l'action de mouvements de convection thermique beaucoup plus lents.

En ce qui concerne le Lac Togo, soumis quotidiennement à l'action prolongée d'une brise de mer diurne, de secteur sud-ouest, assez forte, on constate une agitation des eaux importante, quelle que soit la saison et très nettement croissante de la côte sud-ouest vers la côte nord-est du Lac.

Cette agitation mécanique due à l'action du vent nous semble être le principal facteur de mise en circulation et d'homogénéisation des eaux du Lac, étant donnée la très faible profondeur du milieu.

1.2 La méthode d'investigation du traçage salin

Des mélanges successifs entre des eaux de composition chimique différente s'établissent progressivement à la faveur de ces turbulences mécaniques (ou convectives) et permettent l'évolution de la qualité des eaux sur l'ensemble du plan d'eau du Lac, de façon étroitement liée aux conditions régionales de l'action du vent, de l'écoulement des eaux et de la morphologie locale du Lac.

L'évolution spatiale et saisonnière de la configuration des courbes d'isosalinité, permet d'apprécier les mouvements de circulation des masses d'eau dans les différentes parties du Lac (cf. IV, Fig. 23 à 48).

On rappellera que cette méthode n'est concevable que si l'on considère que les vitesses de diffusion des ions en solution ne sont pas significativement différentes des vitesses de déplacement des eaux. Or, si on reprend l'équation de FICK établissant le flux massique des particules dans un fluide au repos de façon proportionnelle au gradient des concentrations, on a :

$$\emptyset = - d_o \text{ grad } C$$

avec $\emptyset$: le flux massique de particule en mole/m²/sec

grad C : le gradient de concentration en mole/m⁴

d_o : le coefficient de proportionnalité tel que :

$$d_o = \frac{RT}{N} \cdot \frac{1}{6\ \pi\mu r}$$

avec R : la constante des gaz parfaits

N : le nombre d'Avogadro

T : la température absolue du fluide

μ : la viscosité du fluide

r : le rayon moyen des agrégats moléculaires qui diffusent

$d_o = 1{,}3 \ .10^{-9}$ m²/sec pour NaCl à 20°C. (G. DE MARSILY, 1981).

Si l'on considère le gradient de concentration maximal observé entre les zones 5 et 4 du Lac Togo au cours des étiages 1981 et 1982 et qui est de 10 moles/m⁴, on obtient un flux massique de chlorure de sodium, voisin de 2 mg/m²/mois, ce qui représente une perte saline mensuelle de 16 kg de NaCl pour la zone 5, ce qui est totalement insignifiant devant l'augmentation mensuelle moyenne du stock salin, calculée pour la zone 4 voisine, entre les mois de janvier et juin 1982, qui est de 4 000 tonnes NaCl par mois.

La propagation de la salinité des eaux dans le Lac Togo sera donc considérée comme un bon indicateur du mouvement des eaux du Lac.

1.3 Principales caractéristiques de la dynamique des eaux lagunaires

1.3.1 Le mélange des eaux d'origine diverse

a - L'étude des variations saisonnières de la masse de chlorure de sodium en solution dans les différentes parties du système lagunaire (cf. IV, 26, Fig. 54 et 55), a permis de mettre en évidence une augmentation

très importante et très rapide des stocks salins tout au long de la période d'étiage, ce qui révèle la remontée vers l'amont du système, d'une masse de sel qui ne peut être qu'allochtone, progressant par mélanges successifs de masses d'eau de charges salines différentes et qui trouverait son origine à partir de la lagune d'Aneho, où se développe au cours de chaque période d'étiage et même en période de fermeture du cordon littoral, une très forte salinité, sous influence marine. Cette influence océanique progressant de l'aval vers l'amont au cours de l'étiage, est également confirmée par l'évolution des rapports ioniques Rx (cf. IV, 2.3).

b - l'étude du diagramme spatio-temporel de salinité (cf. IV, Fig. 50), met en évidence quelques caractéristiques des échanges de masses d'eau lagunaires au cours d'un cycle hydrologique :

- On remarque le balancement annuel entre l'influence à l'étiage des eaux marines qui provoquent la remontée progressive vers le nord-ouest du système, d'un front salé conduisant, de décembre à juin, à l'établissement d'un gradient nord-sud de salinité élevée et qui s'oppose en période de crue à l'influence des eaux continentales, fluviatiles et météoriques, qui envahissent l'ensemble du système lagunaire conduisant très brutalement à une homégénéisation de l'ensemble du plan d'eau.

- La rapidité du retrait de la salinité des eaux dès le début de la saison humide et liée à un phénomène général d'écoulement vers l'aval du système, s'oppose à la remontée très progressive du front salin, vers l'amont qui est sensible tout d'abord dès le tout début de l'étiage au niveau de la lagune d'Aneho, avant de se propager ultérieurement vers le nord du Lac Togo, à la faveur du brassage mécanique in situ des eaux stables du Lac à l'étiage et du mouvement d'écoulement lagunaire d'étiage (cf. III, 3.2.4).

- On notera l'importante variation interannuelle de la salinité des eaux lagunaires, entre l'étiage 1981 consécutif à l'ouverture du cordon lagunaire sur la mer à Aneho et l'étiage 1982 consécutif à la fermeture prolongée de ce cordon lagunaire et qui se traduit par une atténuation très importante de l'échange salin d'étiage entre les chenaux d'Aneho et le Lac Togo. La remontée de ce front salin lors de l'étiage 1981-82, phénomène que l'on retrouve également à l'amorce de l'étiage 1982-83, pose toutefois le problème de la pénétration dans la lagune d'Aneho des eaux marines, en période de fermeture du cordon littoral.

1.3.2 Les déplacements des eaux dans le Lac Togo

L'étude des incurvations des courbes d'isosalinité, tracées à différentes époques sur le plan d'eau du Lac, (cf. IV, Fig. 23 à 48), met en évidence quelques caractéristiques du mouvement des eaux.

- La progression du front salé ainsi que le retrait de cette salinité s'effectue toujours de façon beaucoup plus rapide le long de la côte nord-est du Lac, la plus exposée au vent et caractérisée par le brassage mécanique des eaux le plus important du Lac et qui serait le siège d'un écoulement de vidange privilégié lors des crues.

- La progression de la salinité des eaux s'effectue aux périodes de plus fort gradient salé (mars-avril), de façon préférentielle en profondeur, ce qui pourrait révéler, outre les phénomènes de densité, l'existence de courants de surface entretenus par le vent régulier de secteur sud-ouest, sur le plan d'eau du Lac. Un tel phénomène a également été observé dans le chenal de Togoville en période de fort gradient (janvier-février).

- L'homogénéisation de la qualité des eaux sur l'ensemble du plan d'eau du Lac Togo, consécutive à la reprise de l'écoulement des eaux de crue des tributaires, épargne lors de son établissement les zones abritées situées le long de la côte sud-ouest du Lac qui conservent en début de crue, de ce fait, une salinité rémanente plus élevée que sur le reste du plan d'eau, inversant provisoirement le sens du gradient de salinité établi à l'étiage.

La dynamique de circulation des eaux dans le Lac Togo, proprement dit, apparaît donc totalement soumise à l'influence des facteurs physiques de brassage des eaux, tels que les vents et les courants de vidange de crue, qui dominent largement par rapport aux conditions thermohalines de circulation (GROEN, 1969 ; ZIMMERMANN, 1981). Quelles que soient les variations saisonnières de la qualité des eaux de ce milieu lagunaire étroitement dépendant, comme tous les autres milieux similaires voisins, des conditions hydroclimatiques régionales, l'homogénéité du milieu sera conservée en permanence par un brassage mécanique journalier, qui peut donc être considéré comme un facteur de stabilité saisonnière, ce qui différencie nettement ces milieux paraliques des formations limnologiques continentales mictiques.

L'étude du diagramme spatio-temporel de salinité des eaux lagunaires (cf. IV, Fig. 50) permet d'établir les vitesses moyennes théorique de propagation de la salinité entre les différentes zones définies sur le Lac Togo et les lagunes (cf. I, Fig. 6). On notera des vitesses de propagation assez élevées pouvant atteindre 1800 mètres par jour, dans les zones situées aux extrémités du système lagunaire au nord du Lac Togo et dans le chenal de Togoville, aussi bien lors de la progression que du retrait du front salé.

Par contre, si l'on considère les zones du Lac proprement dit (zones 5- 4- 3- 2), on constate que les vitesses moyennes saisonnières de propagation de la salinité sont identiques en 1981 et en 1982, et seulement fonction du sens de l'évolution. Ces vitesses sont de l'ordre de 160 mètres en moyenne par jour vers le nord en période d'étiage et de 320 mètres par jour vers le sud en période de crue. La similitude interannuelle des vitesses de propagation de la salinité est intéressante et permet de renforcer l'hypothèse selon laquelle le mode de progression de la salinité s'effectue probablement sous l'action de facteurs climatiques, morphologiques et hydrologiques, indépendamment de la gamme des teneurs en présence et indépendamment de l'ouverture du système sur la mer à Aneho.

Il va de soi que le léger déplacement des eaux lagunaires vers le Lac Togo, en période d'étiage minimum et mis en évidence dans le bilan hydrologique (cf. III, 3.2.4), est susceptible de favoriser chaque année la remontée du front salé le long des chenaux lagunaires.

La propagation du matériel en solution semble être de toute façon de type diffusif (avec dispersion), sur l'ensemble des plans d'eau lagunaires, en présence de la forte turbulence locale et l'absence de courant marqué de vidange continentale ou de marée (ZIMMERMANN, 1981). La propagation saline marquée par d'importants gradients horizontaux sur l'ensemble du système tout au long de l'étiage, s'accompagne localement au niveau de la partie centrale du Lac et au niveau de tous les chenaux entre Aneho et Togoville, d'une forte stratification verticale de salinité, surtout sensible en début d'étiage (atteignant une différence de 30 % entre la surface et la profondeur dans le chenal de Togoville) mais qui intègre à la fois un effet classique de densité comme dans le cas d'une circulation "estuarienne" normale et un effet d'entrainement des eaux de surface, par le vent (EMERY et al., 1957 ; GROEN, 1969).

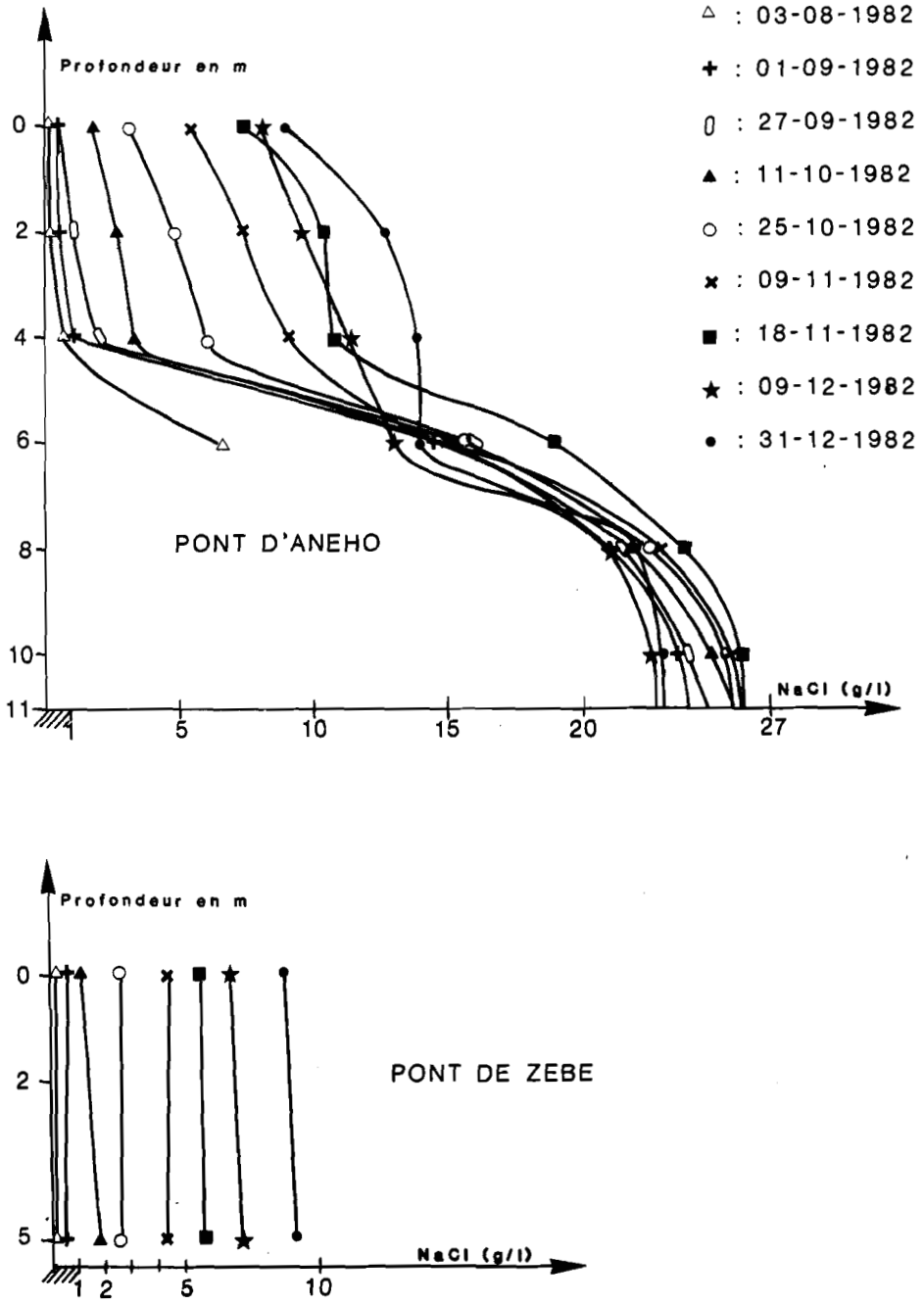


Fig-56 EVOLUTION SPATIALE ET SAISONNIERE DE LA SALINITE DES EAUX LE LONG DE DEUX VERTICALES DE LA LAGUNE D'ANEHO

2 - RELATIONS ENTRE LA LAGUNE D'ANEHO ET LA MER

2.1 En période de fermeture du cordon littoral

2.1.1 La propagation des ondes marée

Les enregistrements limnigraphiques des quatre stations situées sur les bras lagunaires de la lagune d'Aneho au niveau du pont d'Aneho, du pont de Zébé, du pont de Zalivé et sur le Gbaga à Sanvi-Kondji (cf. II Fig. 5), ont permis de mettre en évidence des battements périodiques de la surface des eaux, de période voisine de 12 heures, intervenant sur l'ensemble des quatre stations de façon presque synchrone, se manifestant de manière très régulière avec un marnage maximum compris entre 2 et 4 centimètres selon les stations et apparaissant le plus nettement sur les enregistrements au cours de la période stable d'étiage (décembre-avril).

Après avoir sélectionné 25 phénomènes de ce type pouvant être clairement isolés sur les enregistrements de chacune des stations entre le 1-12-81 et le 31-3-82, nous avons constaté les quelques caractéristiques suivantes :

a - Le mouvement ondulatoire intervient toujours de façon synchrone aux stations de Sanvi-Kondji, de Zébé et d'Aneho, et avec un retard qui peut parfois atteindre 2 heures à la station de Zalivé, la plus éloignée vers le nord-ouest.

b - Les marnages maxima de ces phénomènes sont dans tous les cas compris entre 3 et 5 centimètres sur les stations d'Aneho, de Zébé et de Sanvi-Kondji, mais toujours inférieurs à 2 centimètres à la station de Zalivé qui présente cependant la section mouillée la plus faible.

c - Les phénomènes ondulatoires se manifestent, au cours de la période d'observation, avec un décalage régulier de 6 heures par rapport aux horaires des marées, relevées d'après les tables établies pour le port de Lomé.

Il semble donc que les enregistrements limnigraphiques aient mis en évidence un phénomène de propagation, dans les bras lagunaires, d'une onde marée, qui conjointement avec la propagation du front salé d'étiage, révèle l'existence d'un contact entre la lagune et la mer et nous pouvons émettre deux hypothèses quant à sa localisation :

hypothèse 1 : la lagune entre en relation avec la mer à travers les sables du cordon littoral, très étroit au niveau d'Aneho et les échanges se font par l'intermédiaire de la nappe des sables côtiers, oscillante sous l'effet des marées.

hypothèse 2 : la lagune d'Aneho reçoit les influences d'origine marine (effet de marée et salinité) en provenance du bas-Mono, qui achève son cours au Bénin dans un système lagunaire qui reste en communication permanente avec la mer au lieu dit de "La Bouche du Roi" (Boca del Rio), à côté de Grand Popo au Bénin, à 40 kilomètres, par voie lagunaire, à l'est d'Aneho.

2.1.2 Le problème de la localisation des échanges entre la lagune et la mer

a - Une contamination saline en profondeur ?

Dans le but de mettre en évidence une zone d'échanges éventuels de masse d'eau entre la lagune d'Aneho et la mer, à travers le cordon littoral (hypothèse 1), nous avons procédé à une série de prélèvements d'eau lagunaire, régulièrement effectués de septembre à décembre 1982, au niveau du pont d'Aneho à toutes les profondeurs. La Fig. 56 présente les variations de la salinité des eaux sur l'ensemble de la tranche d'eau, sous le pont d'Aneho et au niveau du pont de Zébé, pour la période qui couvre le début de l'étiage 1982-83 (3 août-31 décembre 1982).

En outre, une série de prélèvements en continu au cours de la journée du 1er septembre 1982, a confirmé la stabilité journalière de la salinité sur l'ensemble de la tranche d'eau, aux deux stations considérées.

On notera, à la station de Zébé, la nette diminution de la salinité par rapport à la station du pont d'Aneho, ainsi que l'absence de toute stratification verticale. On remarquera l'augmentation progressive de la salinité des eaux lagunaires sur les quatre premiers mètres de la tranche d'eau, au niveau du pont d'Aneho, ainsi que l'augmentation très brutale de la salinité à 6 mètres de profondeur au cours du mois d'août 1982. La stabilité des 5 derniers mètres de la tranche d'eau à Aneho contraste avec la stratification de la zone superficielle au même site, ainsi qu'avec les importantes variations de la salinité des eaux, observées sur le reste des lagunes à la même période. La lagune d'Aneho,

pourrait ainsi constituer une sorte de réserve d'eau à très forte salinité, susceptible d'être à l'origine de la migration du front salé d'étiage et d'être entretenue par un échange permanent avec la mer, par l'intermédiaire des eaux interstitielles du cordon littoral. Toutefois, ces éventuels échanges ne peuvent pas être localisés en profondeur, étant donné que les échantillons d'eau prélevés à 10 et 11 mètres de profondeur, sous le pont d'Aneho, à proximité immédiate du fond, dégagent une forte odeur d'H_2S, révélateur d'un milieu profond réducteur, anoxique, et non renouvelé.

b - La stabilité de la nappe superficielle des sables côtiers

Toujours dans le but de localiser plus précisément la zone sensible aux échanges éventuels entre la lagune et la mer, nous avons tenté de suivre l'évolution piézométrique et saline de la nappe superficielle des sables côtiers, pendant un cycle de marée de fort coefficient, au niveau de douze puits sélectionnés dans la partie sud-est de la ville d'Aneho, sur le cordon lagunaire, et à trois reprises entre novembre 1981 et août 1982. Il en résulte les quelques constatations suivantes :

- stabilité parfaite de la piézométrie de chacun des puits au cours d'un cycle de marée ;
- variation piézométrique saisonnière constatée, de l'ordre de 30 à 50 cm ;
- stabilité chimique des eaux de chacun des puits au cours d'un cycle de marée ;
- instabilité chimique saisonnière pour la grande majorité des puits, dans une gamme de salinité comprise entre 37 et 800 mg/l NaCl. Ces variations sont particulièrement marquées au niveau de deux puits voisins situés à l'extrémité sud-est de la ville, à proximité du pont d'Aneho et du rétrécissement du cordon lagunaire. Ces deux derniers puits présentent une salinité variant respectivement entre décembre 1981 et août 1982, de 1500 à 800 mg/l NaCl pour l'un, et de 5000 à 600 mg/l NaCl pour l'autre ;
- grande homogénéité verticale de la qualité des eaux au niveau d'un même puits ;
- grande hétérogénéité de la qualité des eaux d'un puits à l'autre, quelle que soit la saison.

La nappe superficielle des sables côtiers au niveau de la ville d'Aneho, se caractérise donc par l'hétérogénéité spatiale et l'instabilité saisonnière d'une salinité qui reste assez élevée pour des eaux de nappe, mais qui évolue sur un pas de temps assez long, et indépendamment des phénomènes de marée. Les fortes salinités rencontrées en période d'étiage à l'est de la ville, n'excluent pas l'existence d'une influence des eaux lagunaires ou marines, dans cette partie étroite du cordon lagunaire.

Trois piézomètres ont également été étudiés en continu au cours des journées du 11 et 12 août 1982, au niveau de la partie la plus étroite du cordon littoral (cf. II, Fig. 5) et cette très courte observation n'a permis que de constater un très léger battement de la nappe superficielle du cordon littoral, de 9 centimètres d'amplitude mais intervenant en phase avec la marée.

En définitive, la seconde hypothèse relative à une pénétration des eaux marines à l'étiage dans les lagunes togolaises en provenance du Bénin par l'intermédiaire du Gbaga, paraît être la plus probable et semble étayée par les deux points suivants :

- le calcul, établi conformément à cette hypothèse, du débit moyen théorique des apports du Gbaga, au niveau du pont de Zébé, a été déduit des variations des stocks salins lagunaires au Togo (cf. IV, 2.6) et de la concentration connue des eaux du Gbaga à Zébé. Les résultats présentés dans le tableau 25 montrent que l'existence d'un tel courant de transfert entre les lagunes béninoises et togolaises à l'étiage, est tout à fait plausible, d'autant que les débits ainsi calculés concordent (cf. tableau 26) avec ceux qui ont été estimés en janvier, février et mars 1982 devant Togoville, à l'issue du bilan hydrologique du Lac Togo (cf. III, 3.2.4).

- les observations de VARLET (1978), sur la propagation des marées en lagune Ebrié (Côte d'Ivoire), mettent en évidence à 40 kilomètres à l'ouest du canal de Vridi, un marnage lagunaire minimum, de 6 à 7 cm (pour un mètre en mer), décalé de 4 heures par rapport à la marée en mer, ce qui n'est pas en contradiction avec le phénomène observé sur les chenaux lagunaires à Aneho.

VARLET (1978) en Côte d'Ivoire, ainsi que PHLEGER et EWING (1962) au Mexique, insistent sur d'important phénomène d'amortissement des marées en lagune, sous l'effet de l'étroitesse des passes, la longueur et le tracé des

chenaux et les diverses frictions ; les marnages obéissent à des lois d'amortissement selon des relations de décroissance exponentielle en fonction de la distance x.

$$m = m_o \cdot e^{-\mu x}$$

μ de l'ordre de 0,016 km^{-1} en lagune Ebrié.

Il reste à noter que, si de tels plans d'eau lagunaires éloignés de leurs exutoires sur la mer de plusieurs dizaines de kilomètres, peuvent être soumis à l'influence d'ondes marée soit progressives, soit stationnaires, fortement amorties (VARLET, 1978), ces milieux sont également susceptibles de traduire l'influence de phénomènes oscillatoires, non soumis aux marées, moins périodiques, irréguliers, et provenant d'une superposition aléatoire de diverses oscillations de période et d'amplitude différentes, et pouvant se propager à de faibles vitesses de l'ordre de quelques centimètres par seconde (ZIMMERMANN, 1981).

	PERIODE	DEBITS MOYENS ESTIMES DES APPORTS DU GBAGA A ZEBE m^3/s	VITESSES MOYENNES ESTIMEES A TRAVERS LA SECTION DE ZEBE cm/s
1981	du 23-10-81 au 7-11	-3,9	-2,2
	du 7-11 au 23-11	-3,9	-2,4
	du 23-11 au 7-12	2,6	1,7
	du 7-12 au 23-12	4,0	2,9
1982	du 23-12 au 7-1-82	2,8	2,2
	du 7-1 au 23-1	2,4	1,8
	du 23-1 au 7-2	3,1	2,4
	du 7-2 au 23-2	3,6	2,8
	du 23-2 au 7-3	7,4	6,0
	du 7-3 au 23-3	4,9	3,8
	du 23-3 au 7-4	1,9	1,4
	du 7-4 au 23-4	0,4	0,3
	du 23-4 au 7-5	-0,2	-0,2

Tableau 25 : - caractéristiques théoriques des écoulements dans le Gbaga au cours de l'étiage 1981-1982 entre les lagunes béninoises et togolaises.

- le signe négatif indique un écoulement vers l'est (Bénin).

DATE	DEBITS MOYENS MENSUELS ESTIMES A ZEBE m^3/s	DEBITS MOYENS MENSUELS ESTIMES A TOGOVILLE m^3/s
JANVIER 1982	2,7	2
FEVRIER 1982	4,7	4
MARS 1982	4,7	5,6

Tableau 26 : Comparaison du débit moyen mensuel estimé du courant lagunaire d'étiage d'est en ouest, entre les sections de Zébé et Togoville.

Remarque : On a négligé dans tous les calculs les échanges entre les chenaux d'Aneho et le diverticule lagunaire de Vogan (cf. II, Fig. 4).

En outre, conformément à cette dernière hypothèse, la masse d'eau très fortement salée, située en profondeur au contact du cordon littoral devant Aneho doit être considérée comme un reliquat d'eau marine piégé dans la lagune à l'issue de la dernière fermeture du cordon littoral en décembre 1980 et occupant un diverticule mort, sans aucun contact d'importance avec le reste du système lagunaire.

2.2 Le problème de l'ouverture artificielle du cordon littoral

Dans la situation actuelle, le cordon littoral n'est ouvert artificiellement au niveau de sa partie la plus étroite à l'est de la ville d'Aneho, que pour pallier la menace d'inondation de certains villages riverains des lagunes, ce qui intervient une fois tous les deux ans en moyenne, au moment du maximum de crue, entre les mois de juillet et d'octobre. La dernière ouverture du cordon littoral a eu lieu de la fin septembre à la fin décembre 1980 et a provoqué, outre la rapide décrue des lagunes, l'augmentation particulièrement importante de la salinité des eaux lagunaires, jusqu'à l'extrémité nord du Lac Togo, que nous avons pu suivre au cours des 5 mois d'étiage qui ont suivi l'ensablement naturel de l'exutoire, sous l'effet du mouvement des vagues (cf. ch IV). L'ouverture du système lagunaire sur la mer est une opération bien connue des populations riveraines et qui conditionne étroitement les activités de pêche.

2.2.1 Un exemple de prévision de la salinité dans le Lac Togo, en cas d'ouverture prolongée du système lagunaire

L'ouverture artificielle du cordon littoral est toujours suivie, quelques mois plus tard d'une fermeture naturelle de l'exutoire, la durée de l'ouverture du système étant fonction de la dimension de cet exutoire, elle dépend de l'importance des débits de vidange de la lagune, et donc de l'ampleur de la mise en charge initiale qui varie chaque année. Nous avons tenté de prévoir la salinité des eaux dans le Lac Togo, en cas d'ouverture du système sur la mer prolongée artificiellement tout au long de la période d'étiage.

2.2.1.1 Définition :

L'observation comparée de l'évolution de la salinité des eaux lagunaires, au cours de l'étiage 1981 qui a suivi l'ouverture du système à la fin 1980, et au cours de l'étiage 1982 qui a suivi la fermeture prolongée du système au cours de l'année 1981, nous a permis d'émettre les quelques hypothèses suivantes :

- la propagation de la salinité à travers le système lagunaire est issue d'un transfert de masse saline en solution, qui s'effectue chaque année, sous l'effet de facteurs d'ordre morphologique, climatique et hydrologique, qui peuvent varier d'une année sur l'autre.
- le mouvement de cette propagation du front salé est toujours dirigé vers le nord du Lac Togo, au cours des cinq premiers mois de chaque année.
- la propagation du front salé évolue de façon variable dans l'espace et dans le temps, au cours d'un même étiage.
- l'amplitude de l'augmentation de la masse saline d'une zone définie sur la lagune entre deux instants donnés t et $t-_1$, est fonction de la valeur de la masse saline de la zone située immédiatement au sud, à l'instant $t-_1$.

Soit : $S_{i,t}$ = la masse de sel en solution dans la zone lagunaire i, à l'instant t.

$S_{i-1,t}$ = la masse de sel en solution dans la zone lagunaire i-1, située immédiatement au sud de i, à l'instant t.

$S_{Mi,t}$ = la masse de sel maximale en solution dans la zone i, en considérant la salinité des eaux égale à celle de l'eau de mer, à l'instant t.

C_M = la salinité moyenne de l'eau de mer devant Aneho. (Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol., suppl. vol. IV, n° 1, 1966).

$$C_M = 34,5 \ S \ ^o/oo.$$

$C_{i,t}$ = la salinité moyenne des eaux de la zone i, à l'instant t.

$K_{i,t}$ = le coefficient de transfert de la salinité de la zone i-1 à la zone i, dépendant de conditions morphologiques, climatiques et hydrodynamiques de la zone i, à l'instant t.

$$\Delta S_i = S_{i,t} - S_{i,t-1} = K_{i,t} \cdot S_{i-1,t-1} \cdot (S_{Mi,t-1} - S_{i,t-1})$$

$$\text{d'où } \Delta S_i = K_{i,t} \cdot S_{i-1,t-1} \cdot S_{i,t-1} \cdot \left(\frac{C_M - C_{i,t-1}}{C_{i,t-1}}\right)$$

On considère que le stock salin de chaque zone atteint sa valeur limite, lorsque la salinité des eaux atteint la valeur de l'eau de mer, C_M.

2.2.1.2 Le calcul des coefficients de transfert :

Nous avons calculé de façon empirique les coefficients de transfert, K_i, en reprenant l'ensemble des 7 zones (i = 1 à 7) définies sur les plans d'eau lagunaires (cf. II, Fig. 6) et en utilisant les calculs des variations régionales et par quinzaine, des stocks salins au cours de l'étiage 1981 (consécutif à l'ouverture du système), entre le 1er janvier et le 15 juin 1982 (ch IV, Fig. 54 et 55) ainsi que les valeurs régionales de la salinité (ch. IV, Fig. 50).

2.2.1.3 Validité :

La formule précédente utilisant les coefficients empiriques K_i, calculés à l'étiage 1981, ne permet pas de retrouver avec une précision suffisante, les valeurs de salinité observées au cours de l'étiage 1982, consécutif à une fermeture prolongée du système, ce qui renforce l'hypothèse selon laquelle la propagation de la salinité reste étroitement liée aux conditions hydrodynamiques du milieu, variables chaque année.

2.2.1.4 L'ouverture prolongée du système lagunaire sur la mer

Nous cherchons à estimer quelle pourrait être l'évolution saisonnière et spatiale de la salinité des eaux du Lac Togo, dans le cas où l'ouverture du cordon littoral sur la mer interviendrait au moment du maximum de crue dans les mêmes conditions qu'au mois de septembre 1980 mais serait maintenue largement ouverte artificiellement tout au long de la période d'étiage consécutive. Soient les deux hypothèses suivantes :

- l'amorce de la propagation vers l'amont du front salé accompagné par les mouvements de marée, s'effectue dans les mêmes conditions qu'en 1980 et les conditions climatiques et hydrologiques d'étiage sont identiques à celle de 1981. La formule précédente est utilisable avec les coefficients K_i de l'étiage 1981.

- les échanges avec la mer se poursuivant à la faveur de l'ouverture prolongée du cordon littoral et les effets de marée étant encore sensibles jusqu'au débouché de la lagune sur le Lac Togo (FALABREGUES, 1962), on se place dans le cas extrême où les salinités moyennes des eaux des lagunes d'Aneho et de Togoville (zones 7 et 6), se sont équilibrées à leur valeur maximale, égale à celle de l'eau de mer devant Aneho (34,5 $^{o}/oo$).

Le tableau 27 compare les valeurs de la salinité moyenne de chacune des zones du Lac Togo observées au cours de l'étiage 1981 et les valeurs estimées en cas d'ouverture prolongée du cordon littoral.

Sud du Lac Togo — Nord du Lac Togo

ZONE / DATE		5 a	5 b	4 a	4 b	3 a	3 b	2 a	2 b	1 a	1 b
JANVIER	I	2,5	9,5	0,7	0,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	II	4	16	2,1	4,5	0,8	0,8	0,3	0,3	0,3	0,3
FEVRIER	I	5,5	19,5	3,5	9,5	2	3,5	1,5	1,5	1,5	1,5
	II	7	25,5	4,5	13	3	6	2,5	3	2	2
MARS	I	8	28	5,5	15	4	8	3,5	5	3,5	4
	II	9,5	29,5	6,5	18	5	10,5	4,5	7	4,5	5
AVRIL	I	11	32	8	20,5	6	13	5,5	9	5	6
	II	11,5	32,5	9,5	22,5	7	15,5	6,5	11	5,5	7
MAI	I	12,5	33	10,5	24	8	18	8	13,5	7	10
	II	13	34	11	25	9,5	19,5	9,5	16	8	11,5
JUIN	I	13,5	34,5	11,5	25,5	10,5	21,5	10	16,5	8,5	12,5

Tableau 27 : Valeurs comparées sur les 5 zones définies sur le Lac Togo proprement dit, de la salinité moyenne des eaux exprimée en valeur de salinité pratique S.
a - en cas d'ouverture temporaire du cordon littoral (observations à l'étiage 1981).
b - en cas d'ouverture prolongée du cordon littoral au cours de l'étiage (estimations théoriques).
I et II représentent respectivement les première et deuxième quinzaines de chaque mois.

Ainsi, si l'on considère la situation de la première quinzaine de juin, juste avant la reprise de l'écoulement des tributaires, on note, dans le cas d'une ouverture temporaire du système, une variation de la salinité pratique moyenne du sud vers le nord du Lac Togo, comprise respectivement entre 13,5 et 8,5 et comprise entre 34,5 et 12,5 dans le cas d'une ouverture prolongée, ce qui s'accompagne, en outre, d'un gradient de salinité quatre fois plus élevé.

La valeur d'une telle estimation n'est qu'indicative, et les hypothèses émises limitent très étroitement l'utilisation de la formule proposée, qui n'est qu'un exemple permettant simplement d'évaluer un ordre de grandeur de l'impact de la propagation du front salé observé à l'étiage 1981, poussé à l'extrême.

D'une façon plus générale, il est intéressant de noter la fréquence le long de la côte pacifique mexicaine d'un tel type de milieu lagunaire fermé, soumis à l'alternance annuelle de l'ouverture et de la fermeture d'un cordon littoral sableux. Le système lagunaire du Togo pourrait être rapproché de la lagune de Chautengo (99°W - 16°N), 34 km^2, décrite par MEE (1977) et MANDELLI (1981), qui présente un même rythme lagunaire saisonnier en quatre phases (étiage, remplissage, vidange et échange avec la mer) avec un bilan hydrique d'un même ordre de grandeur sous un climat tropical à tendance sêche, ainsi qu'un même balancement saisonnier entre un régime hydroclimatologique à deux crues centrées sur juin et octobre et une influence océanique qui conduit au développement à l'étiage d'une gamme de salinité comparable à celle rencontrée au Togo, sur un milieu dont la profondeur d'étiage reste de l'ordre d'un mètre.

Ces études margino-littorales au Mexique confirment généralement l'importance des facteurs morphologiques et hydroclimatologiques conditionnant le régime hydrodynamique de ces milieux, ainsi que l'importance de l'exportation des nutrients dans l'équilibre trophique lagunaire.

2.2.2 L'ouverture du cordon littoral et les activités de pêche en lagune

2.2.2.1 L'impact d'une ouverture temporaire (1981)

Afin de connaître la façon dont les pêcheurs riverains des lagunes étaient sensibilisés au problème de l'ouverture du cordon littoral sur la mer, et d'évaluer l'impact de la salinité des eaux lagunaires sur les activités saisonnières de pêche, nous avons procédé avec la collaboration de la Direction des Productions Animales, à une petite enquête en août 1982 auprès des pêcheurs des principaux villages riverains du Lac Togo et des lagunes de Togoville et de Vogan, à savoir : Sewatchi-Kope, Agbodrafo, Koulevo, Togokome, Agbodan, Abobo, Adenko-Kondji, Sevatonou, Akoda, Zowola.

Il en résulte les quelques constatations suivantes :

* Dans les lagunes, et le sud du Lac Togo, il semble que soit pratiquée une pêche essentiellement d'étiage, en bénéficiant de l'arrivée souhaitée des eaux salées, chaque année, qui s'accompagne de la pêche de crustacés et d'espèces euryhalines (cf. ANNEXE II) très bien commercialisées.

L'ouverture temporaire du cordon littoral est ressentie comme un gros avantage par l'unanimité des pêcheurs rencontrés, et qui semble se manifester par :

. une augmentation de la variété des espèces ;
. une augmentation importante du nombre de prises (surtout en ce qui concerne les crustacés) ;
. la capture d'individus de grosse taille.

* Dans le nord du Lac Togo, se pratique une alternance entre deux types de pêche saisonnière :

. en période d'étiage : une pêche similaire à celle pratiquée dans le sud, mais beaucoup plus courte (du fait de la remontée tardive du front salé) et ne mobilisant pas l'ensemble de la population de pêcheurs, mais apparaissant intéressante cependant sur le plan commercial (crustacés).
. en saison de crue : une pêche originale à la nasse dans les zones d'inondation, nécessitant le renfort de l'effectif des pêcheurs et caractérisée par l'abondante capture de Clarias et d'Hétérotis, très recherchées et bien commercialisées à cette époque.

L'ouverture temporaire du cordon littoral est également ressentie de façon très bénéfique, à l'étiage mais la totalité des pêcheurs rencontrés paraissent très attachés à la pratique de la pêche en nasse en période de crue.

* Une énorme différence dans la qualité de la pêche semble avoir été vivement ressentie entre l'année 1981, marquée par de bonnes prises et l'année 1982 considérée à l'unanimité des pêcheurs rencontrés, comme catastrophique et caractérisée par la raréfaction des espèces euryhalines et l'absence quasi totale de crustacés.

Les pêcheurs rencontrés, sont à l'unanimité très sensibilisés à l'ouverture annuelle du cordon littoral, opération qu'ils considèrent traditionnellement comme étant, à chaque fois, à l'origine d'une excellente pêche d'étiage, particulièrement lucrative. La lutte contre les dégâts causés dans les filets par l'abondance des crabes ainsi que ceux causés dans les pirogues et les palissades par les Tarets, semble être organisée de façon efficace mais sur la durée d'un étiage seulement.

2.2.2.2 Les problèmes d'une ouverture prolongée

L'ouverture prolongée du système lagunaire sur la mer, tel que ce fût le cas pour le Lac Nokoué au Bénin, de 1959 à 1978, pose immédiatement les trois principaux problèmes suivants :

* Dès la fin du courant de vidange de la lagune, le cordon littoral s'ensable naturellement sous l'action des vagues, et le maintien artificiel de son ouverture au cours d'un étiage complet, risque d'être une opération très coûteuse, et de maintenance laborieuse.

* Une salinité trop élevée et un contact trop long avec la mer risque de favoriser l'implantation de Tarets, responsables d'importants dégâts dans les bois immergés. L'estimation théorique de la salinité résultante d'une ouverture prolongée (cf. § 2.2.1), atteint une valeur de 12 dans la région nord du Lac Togo, ce qui permet l'implantation des deux espèces de Tarets rencontrés dans ce type de milieux lagunaires.

* Enfin, et surtout, l'ouverture prolongée du système sur la mer provoquera une trop forte réduction de l'ampleur et de la durée (voire même la disparition), des crues dans le Lac Togo, ce qui risque d'avoir deux conséquences importantes :

. la baisse de la production de la pêche en nasse effectuée traditionnellement dans les zones inondées par les villages du nord du Lac, sans que la pêche pratiquée dans le Lac à l'étiage ne puisse forcément récupérer ce déficit.

. la baisse de productivité du Lac, qui risque de se trouver privé d'un apport organique important provenant des zones inondées, ce qui pourrait conduire à plus ou moins long terme, à une situation gravement détériorée.

2.2.2.3 Le régime d'alternance

Il apparaît, mais de façon encore bien qualitative, que l'organisation d'une <u>alternance annuelle</u> entre une ouverture temporaire de la lagune sur la mer en fin de période de crue et une fermeture naturelle du système quelques mois plus tard en début d'étiage, serait susceptible d'améliorer la pêche tradition-

nelle d'étiage pratiquée sur les lagunes. Cependant, la date et la durée de l'ouverture devront être soigneusement contrôlées par des études hydrologiques et hydrobiologiques conjointes afin de respecter d'une part une saison de crue et la mise en eau suffisamment longue des zones d'inondation du Lac et d'autre part, une communication suffisamment longue avec la mer, dont la durée est imposée par les exigences du transit des espèces marines et de la mise en place de la salinité requise par ces espèces. Cette durée minimum d'ouverture peut être facilement optimisée avec l'expérience.

CONCLUSION

Cette étude de l'hydroclimat du système lagunaire togolais, bien que limitée à une analyse globale de ce petit milieu paralique, sans se préoccuper de ses mécanismes internes (tels que le cycle des nutrients, les processus de sédimentation, la productivité du milieu ainsi que les divers paramètres descripteurs de la potentialité biologique de la lagune), a toutefois permis d'établir l'ordre de grandeur des termes intervenant dans le bilan hydrologique d'une lagune de faible dimension comme le Lac Togo, en régime équatorial de transition et de mettre en évidence l'impact, sur la qualité des eaux d'étiage, des relations existantes entre la lagune et la mer, en période d'ouverture mais également de fermeture du cordon littoral à Aneho ; ceci confirme l'intégration des lagunes togolaises à un contexte régionale élargi au système lagunaire ouest-béninois du bas-Mono.

Les principales remarques qui ressortent de toute description des milieux lagunaires paraissent être : l'importance de la géomorphologie locale, les caractéristiques de l'environnement physique régional (hydroclimat et dynamique côtière) et enfin, l'extrême variabilité des régimes hydrologiques et hydrochimiques lagunaires, qui en résulte, dans l'espace, au cours des saisons, et d'une année sur l'autre.

La grande productivité traditionnellement reconnue de ces milieux lagunaires, semblerait pouvoir être abordée notamment à travers la notion de confinement par rapport à la mer, définie de façon théorique comme un temps de renouvellement des eaux lagunaires en un point donné par les eaux marines et appréciée de façon empirique par l'observation des zonations biologiques lagunaires, concernant essentiellement le phytoplancton et la macro-faune benthique. De toute manière, seules des études hydrologiques et hydrobiologiques menées conjointement paraissent susceptibles de découvrir les mécanismes de fonctionnement saisonnier d'un écosystème lagunaire et d'en ajuster éventuellement le "degré de confinement" des eaux dans une optique de mise en valeur économique précise.

En ce qui concerne les lagunes togolaises, la mise au point d'une organisation visant à provoquer et à contrôler son ouverture annuelle et temporaire sur la mer, serait en fait, un premier pas essentiel vers l'amélioration de la pêche traditionnelle en lagune.

ANNEXE I

PLUVIOMETRES TOTALISATEURS

Hauteurs de pluie mensuelles et coefficients de THYSSEN

Nom de la STATION	Coeff. de THYSSEN (%)	Hauteurs mensuelles (en mm.)							
		AVRIL 1982	MAI	JUIN	JUIL.	AOUT+SEP.	OCT.	NOV.	DEC.
AGBODRAFO	4,61	117	103	445	135	20	26	4	0
KPESSI	8,12	89	162	311	190	22	22	0	1
AGOMEKPOTA	12,36	82	240	383	76	50	20	0	0
AMEDEHOEVE	3,54	104	246	419	44	26	63	3	0
ABOBO	12,36	117	284	454	80	17	49	4	3
DEKPO	8,24	110	227	560	40	16	64	0	0
SEVA-TONOU	6,39	117	269	509	50	22	56	2	0
ADJIDO	12,98	124	246	510	130	15	42	3	2
EKPOUI	6,18	130	185	512	103	22	27	2	1
TOGOVILLE	5,73	134	236	365	72	24	25	1	4
BADOUGBE	6,84	92	285	354	161	28	36	1	0
KWENOU	2,60	99	217	444	235	22	51	4	1
ANYRO-KOPE	4,20	100	201	435	151	20	54	0	0
ZOWOLA	4,12	89	225	450	122	27	54	2	1
ZEBE	1,73	113	288	419	151	27	40	5	1

ANNEXE II

Liste, non limitative, des principales espèces de poissons et de crustacés rencontrées dans les Lagunes Togolaise. (d'après FAGGIANELLI, D.J., et E., com. pers.).

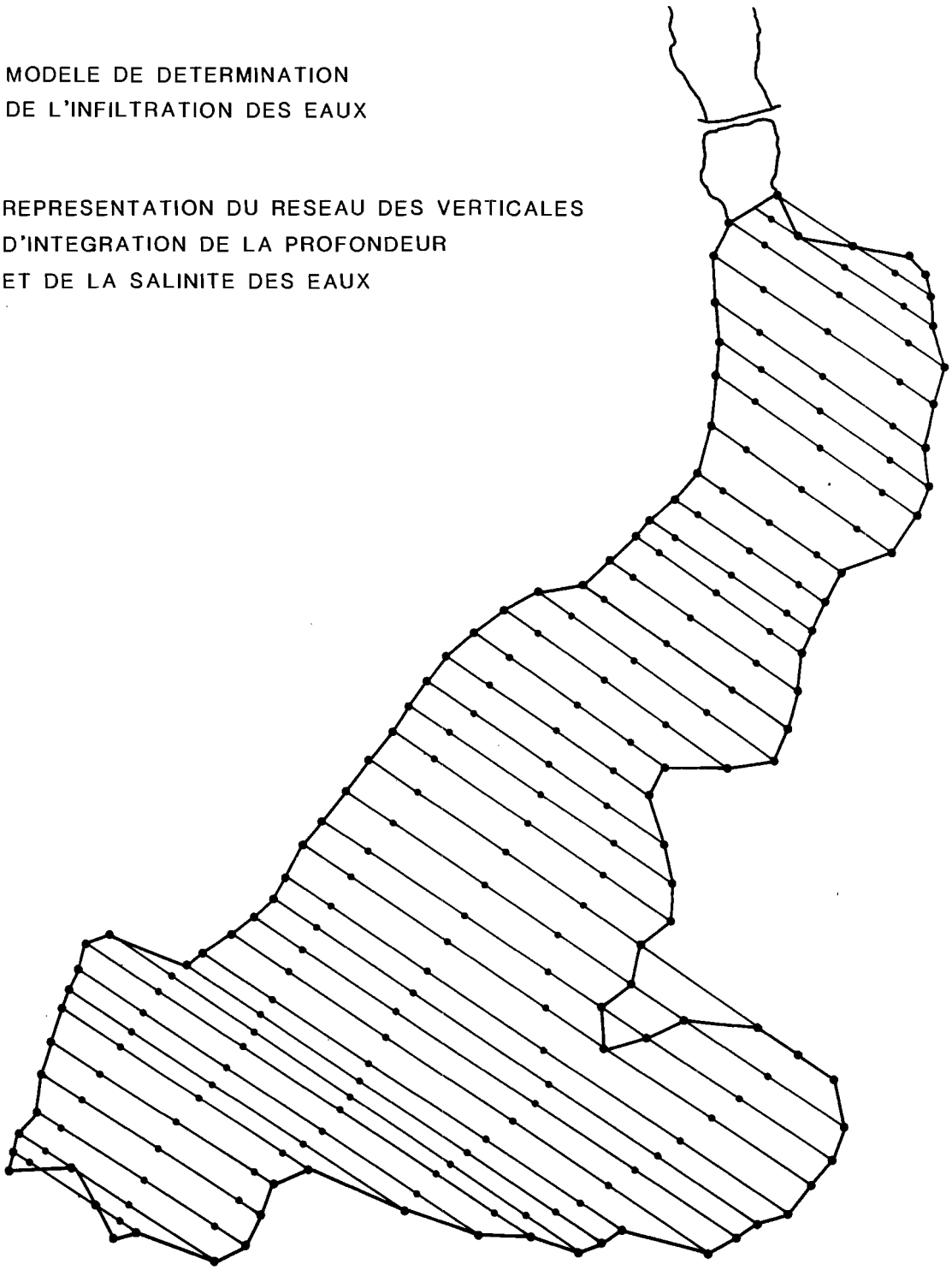
NOM SCIENTIFIQUE	NON VERNACULAIRE
Formes marines :	
Ethmalosa fimbriata	Folevi
Gerres melanopterus	Noutuvi
Gerres nigri	
Citharichthys Stampflii	Afahome
Formes estuariennes :	
Elops lacerta	Agbanvi
Pellonula afzeliusi	Sinkopole
Belone senegalensis	Danhoui
Liza falcipinnis	Guessou,
Liza grandisquamis	Taflavi
Polydactylus quadrifilis	Tikoe, Tsikoe
Pomadasys jubelini	Cocovi
Trachinotus sp.	Cobi
Psettus sebae	Gadaouille
Tilapia heudolotii	Azeguin
Acentrogobius schlegelli	Yanli
Mugil capito	Guessin
Formes continentales :	
Heterotis niloticus	Epan
Gymnarchus niloticus	Eyo
Schilbe mystus	Aounglevi
Synodontis sp.	Sossoglossoe
Clarias lazera	Adehoue
Chrysichthys walkeri	Attikpomeblolo
Chrysichthys nigrodigitatus	Blolo
Hetero branchus bidorsalis	Efioji
Protopterus annectens	Ahe, Tovon
Polypterus sp.	Deguin
Ctenopoma kingsleyae	Akinvi
Hepsetus odoe	Zanwo, Zandou
Hemichromis bimaculatus	Ketafio, Bodjinvi
Hemichromis fasciatus	Boevi
Paraphio cephalus obscurus	N'onti
Crustacés :	
Penaeus duorarum	Bolou
Callinectes Latimanus	Aglae
Macrobrachium	Atsotchi

Annexe III

LAC TOGO

MODELE DE DETERMINATION
DE L'INFILTRATION DES EAUX

REPRESENTATION DU RESEAU DES VERTICALES
D'INTEGRATION DE LA PROFONDEUR
ET DE LA SALINITE DES EAUX



B I B L I O G R A P H I E

ADEGOKE, O.S.; ODEBODE, M.O.; NWACHUKWU, J.I., Sedimentology of the Lagos -
1978 Lekki lagoon complex, Nigeria. 10th Int. Congr. on Sedimentology. Jerusalem, p. 3-4.

AGUESSE, P., La classification des eaux poïkilohalines. Sa difficulté en
1957 Camargue, nouvelle tentative de classification.
Vie milieu, 8 (4) : 341 - 365.

Anonyme, ATLAS du TOGO : "Ressources et Besoins en Eau".
1982 Rép. togolaise, PNUD, Laboratoire Central d'Hydraulique de France, Laboratoire d'Hydrologie de l'O.R.S.T.O.M.

ARAKEL, A.V., Geochemistry and Hydrodynamics in the Hutt and Leeman
1981 evaporitic lagoons (Western Australia) : a comparative study.
Marine Geology, (41) : 1 - 35.

ASSEMIEN, P.; FILLERON, J-C; MARTIN, L.; TASTET, J-P., Le Quaternaire de la
1970 zone littorale de la Côte d'Ivoire.
Bull. A.S.S.E.Q.U.A., Sénégal, n° 25, p. 65 - 78.

AUDOIN, J., Hydrologie de l'Etang de Thau. Revue des Travaux de l'ISTPM
1962 (mars).

BAUDIN, J-P., Contribution à l'Etude Ecologique des milieux saumâtres
1980 méditerranéens.
Vie Milieu, vol. 30, n° 2 : 121 - 129.

BERNARD, A., Géographie Universelle XI. Afr. Sept. et Occ. II. A. Colin,
1939 Paris.

BERNARD, H.A.; LE BLANC, R.J.; MAJOR, C.F., Recent and Pleistocene history
1962 of south east Texas.
Houston Geol. Soc. : 175 - 224

BORCHERT, H., Principles of oceanic salt deposition and metamorphism.
1965 p. 205 - 276. In = J.P. RILEY and G. SKIRROW (eds.).
Chemical oceanography, vol. 2.

BOUCHEY, A.S., Ecological Studies of tropical coast-lines.
1957 J. of Ecology, (45) : 665 - 687.

BOUTIERE, H., Etang de Bages-Sigean - Modèle de lagune méditerranéenne.
1974a Vie Milieu, (24), 1B : 23 - 58.

BOYCE, S.G., The salt spray community.
1954 Ecol. Monogr., 24, 29.

CARMOUZE, J.P., Les grands traits de l'hydrologie et de l'hydrochimie du
1976 Lac Tchad.
Cah. ORSTOM , Série Hydrobiologie, Vol. X, n° 1.

CARPELAN, L.H., Physical caracteristics of southern California coastal
1969 lagoons.
In : Lagunas Costeras, un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 319 - 334.
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.).

CARRADA, G.C., Nychthemeral cycle of nutrients in a meromictics brackish
1975 water lagoon.
Comm. Int. Expl. Sci. Mer. Med., 23,3 : 81 - 84.

CROMWELL, J.E., Processes, sediments and history of Laguna Superior, Oaxaca,
1975 Mexico.
Ph. - D. Diss., Univ. California, San Diego.

CROSNIER, A.; BERRIT, G.R., Fonds de pêche le long des côtes du Togo et du
1966 Dahomey.
Cah. ORSTOM, Série Hydrobiologie, Suppl. Vol. IV, n° 1.

CURRAY, J.R., Late Quaternay Sea Level - a discussion -
1961 Bull. Geol. Soc. Am., 72 : 1707 - 1712.

DAGET, J.; DURAND, J.R., Etude du peuplement de poisson d'un milieu
1968 saumâtre tropical poïkilohalin : la baie de Cocody en Côte d'Ivoire.
Cah. ORSTOM, Série Hydrobiologie, II, 2 : 91 - 111.

DAHL, E., Ecological salinity boundaries in poïkilohaline waters.
1956 Oikos, VII, I.

DE BEAUMONT, E., Leçons de Géologie Pratique, Paris, : 223 - 252.
1845

DE MARSILY, G., Hydrogéologie Quantitative..
1981 Collection Sciences de la Terre, Masson (éd.), Paris.

DE ROUVILLE, M.A., Le régime des côtes.
1946 Dunod, Paris.

DUFOUR, Ph.; LEMASSON, L.; CREMOUX, J.L., Contrôle nutritif de la biomasse
1981 du seston dans une lagune tropicale de Côte d'Ivoire - II - Variations
géographiques et saisonnières -
J. Exp. Mar. Biol. Ecol., 51 : 269 - 284.

DURAND, J.R.; CHANTRAINE, J.M., L'environnement climatique des lagunes
1982 ivoiriennes.
Revue d'Hydrobiologie Tropicale (ORSTOM), 15 (2) : 83 - 190.

DURAND, J.R.; SKUBICH, M., Les lagunes ivoiriennes.
1982 Aquaculture, 27 : 211 - 250.
Elsevier Sci. Publ. Comp. Amsterdam.

DUSSART, B., Limnologie - L'étude des eaux continentales.
1966 Gautier-Villars (éd.), Paris.

EMERY, K.O.; STEVENSON, R.E., Estuaries and lagoons.
1957 I. Physical and chemical characteristics.
Geol. Soc. Am. Mem., 67, (1) : 673 - 693.

EMERY, K.O., A coastal pond studied by oceanographic methods.
1969 Elsevier Sci. Publ. Comp. N.Y.

EVANS, G.; BUSH, P., Some oceanographical and sedimentological
1969 observations on a Persian Gulf lagoon.
in : Lagunas Costeras, un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 155 - 170.
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.)

FERNANDEZ, H.; VASQUEZ, F.; MILLERO, F.J., The density and composition of
1982 hypersaline water of a mexican lagoon.
Limnol - Oceanogr., 27 (2) = 315 - 321.

FISK, H.N., Padre Island and the Laguna Madre flats - Coastal South Texas.
1959 In "Second Coastal Geography Conf.".
Nat. Acad. Sci. Nat. Res. Com., : 103 - 151.

FLEMMING, B.W., Langebaan lagoon : a mixed carbonate siliclastic tidal
1977 environment in semi-arid climate.
Sedimentary geology, n° 18.

FONTES, J.C., Isotopes du milieu et cycles des eaux naturelles - Quelques
1976 aspects.
Thèse Doc. d'Etat - Univ. PARIS VI.

GERMAIN, P., Contribution à la connaissance du Quaternaire récent du
1975 littoral dahoméen.
Bull. A.S.S.E.Q.U.A., Sénégal, n° 44-45, pp. 33 - 45.

GLANGEAUD, L., Le mouvement des sédiments et la formation des bancs, seuils,
1939 mouilles dans la Gironde et la Garonne.
Congr. Int. Union Géod. et Géol.
Potamologie, 93, R.6, Washington.

GRAF, W.H., Hydrodynamics of lakes.
1979 Elsevier Sci. Publ. Comp. N.Y.

GROEN, P., Physical Hydrology of coastal lagoon.
1969 In : Lagunas costeras, un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 275 - 280.
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.).

GUELORGET, O.; PERTHUISOT, J.P., "Le Domaine Paralique".
1983 Expressions Géologiques, Biologiques et Economiques du Confinement.
Presses de l'Ecole Normale Supérieure, Paris.

GUILCHERT, A., Coastal sand ridges and marshes and their environment near
1959 Grand-Popo and Ouidah, Dahomey.
in : R.J. RUSSEL, 2nd Coastal Geogr. Conf. Louisiana State University
Coast Studies Inst. : 189 - 212.

HERVE, P.; BRUSLE, J., L'étang de Salses-Leucate.
1980 Ecologie générale et Ichtyofaune.
Vie Milieu, 30 (3-4) : 275 - 283.

HILL, M.B.; WEBB, J.E.,
1958 The Ecology of Lagos lagoon.
II. The topography and physical features of Lagos harbour and Lagos lagoon.
Phil. Trans. Roy. Soc., London, Sér. B, vol. 681, n° 241 : 319-333

HINGSTON, F.J.; GARLITIS, V., The geographic variations of salt
1976 precipitated over Western Australia.
Austr. J. Soil Res., 14 : 319 - 335.

HOYT, J.H., Barrier Island formation.
1967 Bull. Geol. Soc. Am., 78 : 1125 - 1135.

I.A.E.A., Guide book on nuclear technics in hydrology.
1968 Technical reports Series, n° 91.

I.G.N., Cartes au 1/50.000 ème du TOGO.
1960 LOME 1b, 1d, 2a-2c.
(feuille NB-31 XIV).

JEDOUI, Y.; BOBIER, Cl.; CIRAC, P.; PUJOS, M., Contribution à la connaissance
1981 des systèmes lagunaires en domaine méditerranéen.
Hydrologie et Sédimentologie du Bahiret el Bou Grara (TUNISIE).
Tethys, 10 (1) : 39 - 52.

JELERGSMA, S., Holocene sea level change in the Netherlands.
1961 Med. Geol. Stich., ser. C, VI (7), 100 p.

JOHNSON, D.W., Shore processes and shoreline development.
1919 N.Y. 584 p.

JONES, D.; WILL, M.S., The attenuation of light in sea and estuarine
1956 waters in relation to concentration of suspended solid water.
J. Mar. Biol. Ass., Londres, U.K., 35, 2 : 431 - 444.

JUNNER, N.R., In : Gold Coast Geol. Survey Bull., 11.
1940

KERAMBRUN, P., La charge en matériel organique disponible sous forme
1977 particulaire en suspension dans quelques étangs méditerranéens.
Rapp. Com. Int. Expl. Sci. Mer. Med., vol. 24, (6).

KIENER, A., Ecologie-Physiologie et Economie des eaux saumâtres.
1978 Masson (éd.), Paris.

KING, C.A., Beaches and coasts.
1972 2ème éd. - N.Y. Martins Press - 570 p.

KITSON, A.E., The Gold coast : some considerations of its structure -
1916 people and natural history.
Geogr. J., 47, p. 369.

KOURIATCHY, N., Bull. Com. AOF., 16, (4).
1934

KRUMGALTZ, B.; HORNUNG, H.; OREN, O.H., The study of a natural hypersaline
1980 lagoon in a desert area (the Bardawil lagoon - Sinaï).
Estuarine Coastal Mar. Sci., (10) : 403 - 415.

KWEI, E.A., Biological, chemical and hydrological characters of coastal
1977 lagoons of Ghana.
Hydrobiologia, vol. 56, (2) : 157 - 174.

LAFOND, L.R., Etudes littorales et estuariennes en zone intertropicale
1967 humide.
Thèse Doct., Univ. d'Orsay.

LANKFORD, R.R., Coastal lagoons of Mexico : their origin and
1977 classification - pp. 182 - 215.
In : M. Wiley (ed.), Estuarine Processes, vol. 2.

LANG, J.; PARADIS, G., Un exemple d'environnement sédimentaire
1977 bio-détritique non carbonaté, marin et continental, holocène, en climat intertropical (ex. Dahomey).
Rev. Geogr. Phys. Géol. Dyn. Paris, vol. XIX, fasc. 3 : 295 - 312.

LARRAS, J., Embouchures - Estuaires - lagunes et deltas, Eyrolles, Paris.
1964

LECOLLE, J., Evolution d'un milieu fluvio-marin à l'embouchure d'un fleuve
1972 sous climat intertropical humide : Sédimentologie et physico-chimie.
Thèse Doct., Université de Nice.

LEVY, A., Eaux saumâtres et milieux margino-littoraux.
1971 Rev. Geogr. Phys. et Géol. Dyn.,
Paris, vol. XIII, facs. 3, : 269 - 278.

LEVY, Y., The origin and evolution of brine in coastal Sabkhas, Northern
1977 Sinaï.
J. Sediment Petrol., 47 : 451 - 462.

MACET, A., On the specific gravity and temperature of sea water in
1819 different parts of the ocean and particular seas.
Phil. Trans. Roy. Soc. London, Ser. A, 109 : 161 - 208.

MANDELLI, E.F., On the hydrography and chemistry of some coastal lagoons
1981 of the pacific coast of Mexico.
In : Coastal lagoon research - present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 81 - 96.

MANOLELI, D., Le Lac Belona - Eutrophisation.
1977 Rapp. Com. Int. Expl. Sci. Mer. Méd., vol. 24, n° 6.

MEDHIOUB, K., "Le Bahiret el Biban" - Etude géochimique et sédimentologie
1979 d'une lagune du Sud-Est Tunisien.
Th. 3ème cycle - Univ. Paris VI.

MEE, L.D., The chemistry and hydrography of some coastal lagoons - Pacific
1977 coast of Mexico.
Ph. - D., Univ. of Liverpool, 117 p.

MILLERO, F.J., Sea water as a multicomponent electrolyte solution
1974 p. 3 - 80.
In : E. GOLDBERG (ed.), The Sea, vol. 5.

MILLERO, F.J.; GONZALEZ, A.; WARD, G.K., The density of sea water solutions
1976 at one atmosphere as a function of temperature and salinity.
J. Mar. Res, 34 : 61 - 93.

MINAS, M., Observations sur les changements rapides dans l'évolution des
1975 structures hydrologique de l'étang de Berre.
Rapp. Com. Int. Expl. Mer. Méd., vol. 23, n° 3 : 49.

MINAS, M., Aspects particuliers de l'eutrophisation liée à l'action des
1977 vents dans l'étang de Berre.
Rapp. Com. Int. Expl. Mer. Méd., vol. 24, n° 4.

MONNET, Cl., Contribution à l'étude de la dynamique et de la nature des
1972 suspensions d'un fleuve intertropical. Le Bandama. Evolution des éléments chimiques des eaux de son estuaire.
Thèse Doct. Univ. de Nice.

MONTENY, P.A.; LHOMME, J.P., Données climatiques recueillies à la station
1980 ORSTOM, Adiopodoumé (1948 - 1979).

MORLIERE, A., Les saisons marines devant Abidjan.
1970 C.R.O. - Abidjan, I, 2 : 1 - 15.

NICHOLS, M.; ALLEN, G., Suspended sediment transport in coastal lagoons
1981 and estuaries.
In : Coastal lagoon research - Present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 27 - 80.

NISBET, M.; VERNEAUX, J., Composantes chimiques des eaux courantes.
1970 Annales de limnologie, t. 6, facs. 2, : 161 - 190.

NIXON, S.W.; LEE, V., The flux of carbon, nitrogen and phosphorus between
1981 coastal lagoons and offshore waters.
In : Coastal lagoon, present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 325 - 348.

OBENG, E.K., A limnological study of the Afram arm of Volta Lake (Ghana).
1977 Hydrobiologia, vol. 55, 3 : 257 - 267.

OKUDA, T., Estudio comparativo de las condiciones hidrograficas de las
1969 lagunas de Unare y Tacarigua (Venezuela).
In : Lagunas costeras, un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 291 - 300,
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.).

OKUDA, T., Inorganic and organic nitrogen contents in some coastal lagoons
1981 in Venezuela.
In : Coastal lagoon research - Present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 119 - 134.

OLANYIAN, C.I.O., A review of the potentialities for research and fish
1981 culture in the coastal lagoons of west Africa.
In : Coastal lagoon research - Present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 261 - 272.

OTTMANN, F. et J.M., Les sédiments de l'embouchure du Capibaribe. Récife
1960 (Bresil).
Trab. I.B.M.O. Univ. Recife, 1,1 : 51 - 69.

OTTMANN, F., Introduction à la géologie marine et littorale.
1965 Masson (éd.), Paris.

PAGES, J.; LEMASSON, L.; DUFOUR, Ph.; Eléments nutritifs et production
1979 primaire dans les lagunes de Côte d'Ivoire.
C.R.O. Abidjan, 5, 1 : 1 - 60.

PETIT, G., Quelques considérations sur la biologie des eaux saumâtres
1962 méditerranéennes. Publ. Staz. Zool. Napoli, 32, Suppl : 205 - 218.

PHLEGER, F.B., Ecology and distribution of recent foraminifera.
1960 J. HOPKINS (éd.), 297 p.

PHLEGER, F.B.; EWING, G.C., Sedimentology and oceanography of coastal
1962 lagoons in Baja, California, Mexico.
Geol. Soc. Am. Bull., vol. 73 : 143 - 182.

PHLEGER, F.B., Sedimentology of Guerrero Negro lagoon - Baja
1965 - b California, Mexico.
Colston Papers, London, 17 : 205 - 237.

PHLEGER, F.B., Some general features of coastal lagoons.
1969 In : Lagunas costeras, un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 5 - 26,
PHLEGER ET AYALA-CASTANARES (eds.).

PHLEGER, F.B.; AYALA-CASTANARES, A., Ecology and development of two
1972 coastal lagoons in North-West Mexico.
Ann. Inst. Biol. Univ. Nac. Auton. Mexico.,
Ser. Cienc. del Mar y Limnol., vol. 43, n° 1 : 1 - 20.

PHLEGER, F.B., A review of some general feature of coastal lagoons.
1981 In : Coastal lagoon research - present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 7 - 14.

PLIYA, J., La pêche dans le sud-ouest du Bénin.
1980 Agence de Coopération Culturelle et Technique.

POSTMA, H., Chemistry of coastal lagoons.
1969 In : Lagunas costeras un simposio,
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 421 - 430.
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.).

POUYAUD, B., Etude de l'évaporation d'un lac en climat soudano-sahélien,
1979 le Lac de BAM (Haute-Volta).
Cah. ORSTOM, Série Hydrologie, vol. XVI, n° 2.

PRAVDIC, V., Surface charge characterization of sea sediment.
1970 Limnol. Oceanogr., 15, 2, : 230 - 233.

PUGH, J.C., A classification of the Nigerian coast lines.
1954 J. West African, Sci. Ass., Lagos, 1 : 3 - 12.

RABIER, J.; KLINGEBIEL, A.; LANG, J., Etudes sédimentologiques de la
1979 lagune de Porto-Novo (Bénin).
Bull. Inst. Géol. Bass. Aquit., n° 25, : 31 - 55.

REINHOLD, R.J.; DAIKER, F.C., Eutrophication of estuarine areas by rain
1967 water.
Chesapeake Sci, vol. 8, n° 2 : 132 - 133.

RILEY, J.P.; TONGUDAI, M., The major cation-chlorinity ratios in sea
1967 water.
Chem. Geology, 2,3 : 263 - 269.

RIOU, C., La détermination pratique de l'évaporation.
1975 Mém. ORSTOM, n° 80, Paris.

ROCHE, M., Hydrologie de Surface.
1963 Gauthier-Villars (ed.), Paris.

ROCHE, M.A., Traçage naturel salin et isotopique des eaux du système
1980 hydrologique du Lac Tchad.
Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 117, Paris.

ROCHEFORD, D.J.,
1951-b Studies in Australian estuarine hydrology. I = Introduction and comparative features. Austr. J. Mar. Fresh. Res., vol.2, n°1, : 1-116.

ROUGERIE, G., Etudes morphologiques du bassin de la Bia et des régions
1951 littorales de la lagune Aby (Côte d'Ivoire).
Etudes Eburnéennes, 2.

RUSNAK, G.A., Sediments of Laguna Madre (Texas).
1960 In : SHEPARD F.P. et al. (eds.).
Recent Sediments Nord-West Gulf of Mexico.
Am. Ass. Petrol. Geol., Tulsa. Okl. : 153 - 196.

SAVOURE, B., Etude hydrobiologique des lagunes du Nord de la Tunisie.
1977 Hydrobiologia, vol. 56, 3.

SCHOLL, D.W., Recent sedimentary record in mangrove, swamps and rise in
1964 sea level over the south-western coast of Florida.
Mar. Geol., (1) : 344 - 366.

SEYLER, P., Les milieux lagunaires en environnement non carbonaté.
1980 D.E.A., E.N.S. Ulm.

SHEPARD, F.P., Late Pleistocene and recent history of the Central Texas
1956 coast.
J. Geol. 64 : 56 - 69.

SMITH, S.W.; JOKIEL, P.L.,
1975 Water composition and biogeochemical gradients in the Canton Atoll lagoon.
Mar. Sci. Communication, 1(1) : 75 - 100.

STOMMEL, H.; FARMER, H., On the nature of estuarine circulation -
1952 Part. III.
Tech. Rept. W.H.O., 52 - 63.

SVERDRUP, H.U.; JOHNSON, M.W.; FLEMING, R.H., The oceans,
1942 Prentice Hall, N.Y., 1087 p.

TASTET, J.P., Les formations sédimentaires quaternaires à actuelles du
1975 littoral du Dahomey.
Notice explicative de la carte géologique.
Bull. A.S.S.E.Q.U.A., Sénégal, n° 46, : 21 - 44.

TEXIER, H.; DOSSOU, C.; COLLEUIL, B., Etude de l'environnement lagunaire
1979 du domaine margino-littoral Sud-Béninois - Etude hydrologique préliminaire du Lac Nokoué.
Bull. Inst. Géol. Bass. Aquit., Bordeaux, n° 25, : 149 - 166.

TEXIER, H.; COLLEUIL, B.; PROFIZI, J.P.; DOSSOU, C., Le Lac Nokoué,
1980 environnement du domaine margino-littoral Sud-Béninois : Bathymétrie, lithofacies, salinité, mollusques et peuplements végétaux.
Bull. Inst. Géol. Bass. Aquit., Bordeaux, n° 28 : 115 - 142.

TROLL, C., Thermiche klimatypen der Erde.
1943 Peterman's geogr. Mitt. : 81 - 88

TWENHOFEL, W.H., Treatise on sédimentation - 2nd éd. Williams and Wilkins
1932 (eds.), Baltimore, 926 p.

UNESCO, Tables océanographiques internationales.
1981 UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 36, 37 et 39.

URBAIN, P., Recherches pétrographiques et géochimiques sur deux séries de
1951 roches argileuses.
Imp. Nat., Paris.

VAN ANDELS, L.; POSTMA, H., Provenance, transport and disposition of Rhine
1954 sediments.
H. VEENMANN (ed.), Holland.

VAN STRAATEN, L.M.J.V., Coastal barrier deposits in South and North
1965 Holland.
Meded - Geol. Stichting, N.S., n° 17.

VARLET, F., Le régime de la lagune Ebrié (Côte d'Ivoire).
1978 Travaux et Documents de l'ORSTOM, n° 83.

VITTORI, O.; TAMPIERI, F., Venice : Sea-lagoon exchange in a modified tide
1979 regime.
Science, vol. 204, n° 4390.

VOLTOLINA, A.L. et D., Observaciones hidrologicas en la laguna de la
1974 Restinga (Venezuela).
Soc. de Ciencias Naturales LASALLE Mem., 34, (99) : 203 - 215.

WALKER, T.A., Lack of evidence for evaporation driven circulation in the
1982 Great Barrier Reef lagoon.
Austr. J. Mar. Fresh. Res., 33 : 717 - 722.

WEBB, J.E., The ecology of Lagos lagoon.
1958 I - the lagoons of the Guinea Coast.
Phil. Trans. Roy. Soc. London.,
Sér. B, vol. 681, n° 241 : 307 - 318.

WOLANSKI, E.; JONES, M., Physical properties of Great Barrier Reef
1981-b lagoon water, near Townsville.
Austr. J. Mar. Fresh. W. Res., 32(3) = 305 - 319.

YANEZ-ARANCIBIA, A., Fish occurence, diversity and abundance of two
1981 tropical coastal lagoons with ephemeral inlets on the Pacific coast of
Mexico.
In : Coastal lagoon research, present and future,
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 233 - 260.

ZEIGLER, J.M., Some observations and measurements of wind driven
1969 circulation in a shallow coastal lagoon (Pilgrim, Lake, Mass.USA).
In : Lagunas costeras, un simposio
UNAM-UNESCO, Nov. 1967, Mexico : 335 - 340.
PHLEGER et AYALA-CASTANARES (eds.).

ZIMMERMANN, J.P.F., The flushing of well-mixed tidal lagoons and its
1981 seasonal fluctuations.
In : Coastal lagoon research - present and future
UNESCO Technical Papers in Marine Science, n° 33 : 15 - 26.

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION 7

CHAPITRE I : LES MILIEUX LAGUNAIRES - PRESENTATION ET PROBLEMATIQUE EN REGIME TROPICAL 9

1 - La définition des milieux lagunaires : rigueur dans la diversité 9

2 - La formation des milieux lagunaires : un double héritage, continental et marin 12

3 - Les tentatives de classification des milieux lagunaires 16

4 - Les caractéristiques des milieux lagunaires 23

4.1 - L'influence des facteurs physiques sur l'hydrodynamique lagunaire 23

4.1.1 - L'influence des facteurs hydroclimatologiques continentaux 23

4.1.2 - L'influence des facteurs océanographiques 26

4.2 - Les caractères sédimentologiques et physico-chimiques de l'écosystème lagunaire 28

5 - Les milieux lagunaire en zones inter-tropicales 50

5.1 - Un environnement particulier 50

5.2 - Le Lac Togo : une problématique représentative ? 52

CHAPITRE II : ENVIRONNEMENT DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS : DEFINITION DE L'ETUDE 59

1 - Le milieu naturel 59

2 - Les objectifs de l'étude 61

2.1 - Les études hydroclimatologiques 61

2.2 - Les études hydrochimiques 61

3 - L'organisation de l'étude - méthodologie 63

3.1 - L'étude hydroclimatologique 63

3.2 - L'étude hydrochimique 65

CHAPITRE III : ENVIRONNEMENT GEOLOGIQUE ET HYDROCLIMATOLOGIQUE DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS 71

1 - Principales caractéristiques géologiques du milieu 71

1.1 - Environnement géologique 71

1.2 - Sédimentologie des fonds lagunaires 73

2 - Principales caractéristiques climatiques locales 75

2.1 - Lames d'eau précipitées 75

2.2 - Températures moyennes 79

2.3 - Hygrométrie moyenne 80

2.4 - Durée de l'insolation 81

2.5 - Lames d'eau évaporées 82

3 - Principales caractéristiques hydrologiques du système lagunaire 85

3.1 - Le régime des tributaires principaux 85

3.2 - Le plan d'eau du Lac Togo proprement dit 86

3.2.1 - Variations saisonnières des cotes du plan d'eau 86
3.2.2 - Bathymétrie du Lac Togo 90
3.2.3 - Volumétrie du Lac Togo 92
3.2.4 - Tentative de bilan hydrologique 94

3.2.4.1 - définition des termes du bilan 94
3.2.4.2 - estimation de l'infiltration 97
3.2.4.3 - conclusions 100

3.3 - Les bras lagunaires 103

3.3.1 - Profils en travers 103
3.3.2 - Variations saisonnières des cotes du plan d'eau 106
3.3.3 - Variations saisonnières des pentes de ligne d'eau 106

CHAPITRE IV : QUALITE DES EAUX DU SYSTEME LAGUNAIRE TOGOLAIS 113

1 - Principales caractéristiques physico-chimiques des eaux 113

1.1 - Température 113

1.2 - pH 119

1.3 - Oxygène dissous 121

1.4 - Transparence des eaux 122

1.5 - Matières en suspension 126

1.6 - Conductivité des eaux : traceur salin 127

2 - Principales caractéristiques hydrochimiques des eaux 135

2.1 - Variations saisonnières et spatiales de la salinité 135

2.1.1 - Courbes d'isosalinité dans le Lac Togo 135
2.1.2 - Variations de la salinité dans les chenaux lagunaires de Togoville et d'Aneho 165
2.1.3 - Diagramme spatio-temporel de salinité des eaux 165
2.1.4 - Rapport de salinité 167

2.2 - Variations saisonnières et spatiales de quelques teneurs ioniques 170

2.3 - Variations saisonnières et spatiales de quelques rapports ioniques 175

2.4 - Faciès des eaux lagunaires 180

2.5 - Apports dissous au Lac Togo 183

2.6 - Variations saisonnières et spatiales du stock salin des lagunes 184

CHAPITRE V : DYNAMIQUE DES EAUX DU SYSTEME LAGUNAIRE 189

1 - Caractéristiques du mouvement des eaux dans le Lac Togo 189

1.1 - Facteurs de mise en circulation des eaux 189

1.2 - La méthode d'investigation du traçage salin 189

1.3 - Principales caractéristiques de la dynamique des eaux lagunaires 190

1.3.1 - Le mélange des eaux d'origines diverses 190
1.3.2 - Les déplacements des eaux dans le Lac Togo 192

2 - Relations entre la lagune d'Aneho et la mer 195

2.1 - En période de fermeture du cordon littoral 195

2.1.1 - La propagation des ondes marée 195
2.1.2 - Le problème de la localisation des échanges entre la lagune et la mer 196

2.2 - Le problème de l'ouverture artificielle du cordon littoral 200

2.2.1 - Un exemple de prévision de la salinité dans le Lac Togo, en cas d'ouverture prolongée du système lagunaire 201

2.2.1.1 - définition 201
2.2.1.2 - le calcul des coefficients de transfert 202
2.2.1.3 - validité 202
2.2.1.4 - l'ouverture prolongée du système lagunaire sur la mer 203

2.2.2 - L'ouverture du cordon littoral et les activités de pêche en lagune 205

2.2.2.1 - l'impact d'une ouverture temporaire (1981) 205
2.2.2.2 - les problèmes d'une ouverture prolongée 207
2.2.2.3 - le régime d'alternance 207

CONCLUSION 209

ANNEXE I : Pluviomètres totalisateurs - Hauteurs de pluie mensuelles et coefficients de Thyssen 211

ANNEXE II : Liste non limitative des principales espèces de poissons et de crustacés rencontrées dans le Lac Togo en fonction de son régime hydrologique 212

ANNEXE III : Représentation du réseau des verticales d'intégration de la profondeur et de la salinité des eaux 213

BIBLIOGRAPHIE 215

ORSTOM Éditeur
Dépôt légal : 1er trim. 1986

HYDROLOGIE ET HYDROCHIMIE D'UN MILIEU LAGUNAIRE TROPICAL : LE LAC TOGO

RÉSUMÉ :

Le système lagunaire du «Lac Togo» (64 km^2), est un bon exemple représentatif des milieux paraliques qui se succèdent le long de la côte sableuse du Golfe de Guinée.

Une étude hydroclimatologique du milieu avec couplages de bilans hydrique et salin sur le plan d'eau lagunaire, permet :

- de quantifier les volumes mis en jeu au cours de près de deux cycles hydrologiques lagunaires.
- de mettre en évidence la dynamique journalière, saisonnière et interannuelle de la circulation des eaux lagunaires (de type «lacustre» et de type «estuarienne»).
- de suivre le balancement saisonnier des eaux continentales de crue et marines d'étiage.

Une discussion s'ouvre enfin, sur la façon de limiter le «confinement» du milieu lagunaire.

MOTS-CLÉS :

Togo, Lagune, Bilan hydrologique, hydrodynamique, hydrochimie.

ISSN : 0767-2888

ISBN : 2-7099-0788-7

Éditions de l'ORSTOM
70 route d'Aulnay
F-93140 BONDY