
HYDROCLIMAT ET HYDROCHIMIE

Jean-René DURAND ET Daniel GUIRAL

Les caractères propres de l'écosystème lagunaire résultent de l'interaction de facteurs climatiques directs et indirects qui définissent et structurent l'environnement aquatique dans ses dimensions chimiques et biologiques. L'hydroclimat ici évoqué est essentiellement modelé par le climat du nord du golfe de Guinée (proche de l'équateur). Dans ce travail, notre propos est donc triple : 1° dresser le bilan d'une information disponible ⁽¹⁾ présentant les caractères généraux du climat en insistant sur leur variabilité saisonnière et quand l'information est suffisante sur leur variabilité interannuelle ; 2° établir les bilans hydrologiques des lagunes à partir des échanges aux interfaces ; 3° présenter quelques caractéristiques physiques et chimiques des eaux lagunaires (température, salinité, ions majeurs...) dont les variations spatiotemporelles sont en relation avec l'évolution climatique et hydrologique et, enfin, conclure sur la zonation spatiale des lagunes. Cette zonation a servi de base aux études bioécologiques dont les principaux résultats sont rassemblés dans la suite de cet ouvrage.

Nous ne reviendrons pas sur les aspects géomorphologiques présentés au chapitre précédent, de même, les sels nutritifs et l'oxygène qui interfèrent avec le monde vivant (voir II-1) ne seront pas abordés ici.

En Côte-d'Ivoire, les données climatiques sont relativement anciennes et fournies. Les précipitations sont mesurées régulièrement — depuis plus de 60 ans pour certaines stations (Grand-Lahou, Aboisso, Sassandra par exemple) — et les publications périodiques de l'Anam, ex-Asecna (Agence pour la sécurité de la navigation aérienne en Afrique et à Madagascar) permettent de disposer de toute l'information correspondante. La station bioclimatologique de l'Orstom est suivie depuis 1947 et une synthèse des données relatives aux années 1948-1979 a été publiée par MONTENY et LHOMME (1980). Enfin, les caractéristiques hydrologiques de tous les fleuves de Côte-d'Ivoire ont fait l'objet d'études de la part de l'Orstom depuis 1955 et les bilans annuels correspondants sont publiés par l'Orstom et la Dres (Division des ressources en eaux de surface).

⁽¹⁾ Nous nous sommes largement inspirés d'une première publication (DURAND et CHANTRAINE, 1982). Nous centrons le propos sur la lagune Ébrié, mais les écosystèmes saumâtres adjacents seront évoqués à l'occasion.

L'étude des lagunes n'a, quant à elle, réellement débuté qu'en 1947 avec VARLET (1978) qui a réalisé ses observations de 1947 à 1955. Cette période englobe la création du canal de Vridi (23 juillet 1950) qui a profondément bouleversé l'équilibre antérieur de l'écosystème. Les observations sur le milieu lagunaire ont repris après une interruption de près d'une quinzaine d'années. Depuis, elles ont été fréquentes et nombreuses, sinon continues.

Le climat

Tout entière dans la zone intertropicale (entre 2 et 9° de longitude ouest, 4 et 11° de latitude nord), la Côte-d'Ivoire se situe entre les climats tropicaux et équatoriaux. Elle est ainsi caractérisée par l'existence de deux zones climatiques principales (ELDIN, 1971) auxquelles sont associées deux types de formations végétales climaciques : au nord, le domaine de la forêt claire et de la savane soumis à une seule saison des pluies centrée sur le mois d'août ; au sud, la formation de la forêt sempervirente ombrophile et humide caractérisée par deux saisons des pluies centrées sur juin et octobre.

TABIEAU I
Caractéristiques climatiques moyennes à la station bioclimatique d'Adiopodoumé
M et CV représentent respectivement moyennes et coefficients de variation

Paramètre	Période	J	F	M	A	M	
Rayonnement solaire global ($\text{J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$)	M CV	1968 - 1979	1 520 7,0	1 737 6,1	1 891 6,1	1 927 6,3	1 755 7,9
Durée d'insolation ($\text{h} \cdot \text{mois}^{-1}$)	M CV	1956 - 1979	177 29,7	181 18,9	201 15,5	190 13,8	176 18,6
Température de l'air sous abri (°C)	M CV	1950 - 1979	26,7 2,4	27,5 2,1	27,7 2,2	27,5 2,1	27,0 1,6
	Max. Min.		31,1 22,2	31,9 23,1	32,1 23,3	31,8 23,3	30,9 23,1
Vitesse du vent ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	M CV	1966 - 1979	1,18 13,7	1,43 11,8	1,53 44,5	1,41 9,3	1,23 11,2
Tension de vapeur d'eau (hPa)	M	1969 - 1979	28,7	29,8	29,9	30,1	30,2
Évapotranspiration (Pennman) (mm)	M CV	1968 - 1979	113,6 7,6	121,5 6,8	141,8 7,3	137,3 5,7	126,5 8,3
Précipitations (mm)	M CV	1948 - 1980	28,3 112,0	65,4 82,0	106,4 49,0	143,6 49,0	295,7 42,0

La zone intertropicale est le lieu d'une confluence entre deux masses d'air ; d'une part, la mousson, humide, d'origine océanique et de secteur sud-ouest ; d'autre part, l'harmattan, sec, de secteur nord-est et d'origine continentale. La mise en contact de ces deux masses d'air s'accompagne d'un phénomène de convergence dans les alizés déviés qui entraîne la formation de nuages à l'origine des précipitations. C'est cette zone de convergence tropicale (CIT) que l'on désigne communément sous le nom de « front intertropical » (FIT), sur le continent africain.

Les variations climatiques saisonnières proviennent du déplacement de la CIT en liaison avec le mouvement apparent du soleil. De février à août, la CIT monte de plus en plus en latitude. Il s'ensuit une première saison des pluies sur le littoral avec un décalage progressif vers le nord. Au point de son avancée la plus septentrionale ⁽¹⁾ une seule saison de pluie est ainsi observée. D'août à janvier, la CIT redescend en latitude (plus vite qu'elle n'est montée) entraînant en sens contraire la succession des saisons enregistrées lors de la phase ascendante, mais avec une amplitude moins marquée : c'est le temps des « petites saisons » sur le littoral.

Ce schéma général est vérifié sur une longue période, et la description que nous venons de faire correspond à un déplacement moyen de la CIT. Il existe en fait une variabilité interannuelle notable pour les principaux paramètres climatiques ainsi que pour l'hydrologie fluviale.

Afin de décrire les saisons sur le littoral, nous allons passer en revue les diverses composantes du climat ⁽²⁾ : rayonnement et insolation, température, vent, hygrométrie, évaporation (tabl. I) ; en insistant plus particulièrement pour terminer sur les précipitations.

(in DURAND et CHANTRAINE, 1984 ; d'après MONTENY et LHOMME, 1980)
mensuels ; Ma la moyenne annuelle des moyennes mensuelles

J	J	A	S	O	N	D	Ma	Total cumulé
1 311 8,5	1 222 11,2	1 149 12,6	1 355 10,0	1 658 14,4	1 758 7,3	1 498 9,9	1 565	
92 33,7	96 38,3	78 24,9	89 25,4	158 21,6	194 17,5	179 30,5	151	
25,6 1,9	24,8 2,3	24,4 2,8	25,0 2,1	25,9 2,0	26,5 1,3	26,3 1,7	26,2	
28,7 22,4	27,8 21,8	27,3 21,3	28,0 21,9	29,2 21,8	30,5 22,5	30,1 22,2	30,0 22,4	
1,25 9,1	1,46 6,7	1,59 4,9	1,67 9,6	1,54 15,7	1,19 9,9	1,01 7,1	1,37	
28,7	27,0	26,3	26,9	28,2	29,1	29,3	28,7	
90,2 10,1	90,4 10,1	86,1 11,6	98,0 8,4	122,6 10,8	121,2 7,6	106,8 9,9		1 356
685,5 38,0	250,4 85,0	41,0 124,0	82,3 96,0	168,3 69,0	152,3 42,0	77,2 77,0		2 096,3

⁽¹⁾ Le climat de la moitié septentrionale de la Côte-d'Ivoire ne nous intéresse pas directement mais il a des conséquences indirectes très appréciables pour les lagunes car il conditionne le rythme d'arrivée des eaux fluviales transportées par les grands fleuves soudaniens (cf. *infra*).

⁽²⁾ D'après les données de la station de bioclimatologie de l'Orstom à Adiopodoumé, 5° 19' lat. nord, 4° 13' long. ouest, 29 m d'altitude (MONTENY et LHOMME, 1980).

RAYONNEMENT ET INSOLATION

D'après les cartes de distribution mondiale du rayonnement solaire, la quantité d'énergie reçue en moyenne dans la région du littoral ivoirien est de l'ordre de $1\ 150\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$ (BUDYKO, 1958).

La valeur moyenne obtenue en 12 années de mesures à Adiopodoumé (1968-1979) est de $1\ 565\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$. L'écart (27 %) entre les deux chiffres est cohérent car la série d'Adiopodoumé correspond à une période de sécheresse, et est donc moins nuageuse et plus ensoleillée que la série plus longue de BUDYKO (GALLARDO, comm. pers.).

Les variations saisonnières sont marquées (fig. 1) puisque les valeurs moyennes du mois d'août, valeurs minimales, ne représentent que 60 % du maximum de mars-avril. Le cycle annuel est caractérisé par deux périodes de rayonnement élevé d'inégale intensité (fort de mars à mai et sensiblement plus faible en octobre et novembre) et deux périodes pendant lesquelles le rayonnement global est plus faible. En relation avec l'importance de la couverture nuageuse, les valeurs minimales annuelles sont observées de juin à septembre ($1\ 255\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$), alors que les faibles intensités en décembre-janvier ($1\ 504\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$) sont dues à l'accroissement de l'angle d'incidence des rayons solaires et à des brouillards fréquents (tabl. I). Durant la période « sèche » 1968-1979, la variabilité des moyennes interannuelles est faible (les moyennes annuelles extrêmes n'ont été respectivement que de $1\ 484$ et $1\ 630\text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$). Pour un mois donné, les variations sont évidemment plus élevées mais les coefficients de variation restent généralement bas et inférieurs à 10 %.

Les variations mensuelles des durées d'insolation suivent sensiblement celles du rayonnement (fig. 1). Cependant l'amplitude saisonnière est plus marquée ; la durée d'insolation en août ne représentant que 40 % de la moyenne du mois de mars (données 1956-1979). En outre, à durée d'insolation égale, les rayonnements peuvent être significativement différents : c'est le cas par exemple pour mai et janvier (influence de l'harmattan). Réciproquement, en juin et septembre, le rayonnement global est identique alors que les durées d'insolation diffèrent sensiblement.

À l'échelle journalière et compte tenu de sa position proche de l'équateur, la durée de l'éclaircissement est constante en Côte-d'Ivoire au cours de l'année et caractérisée par une égalité des jours et des nuits.

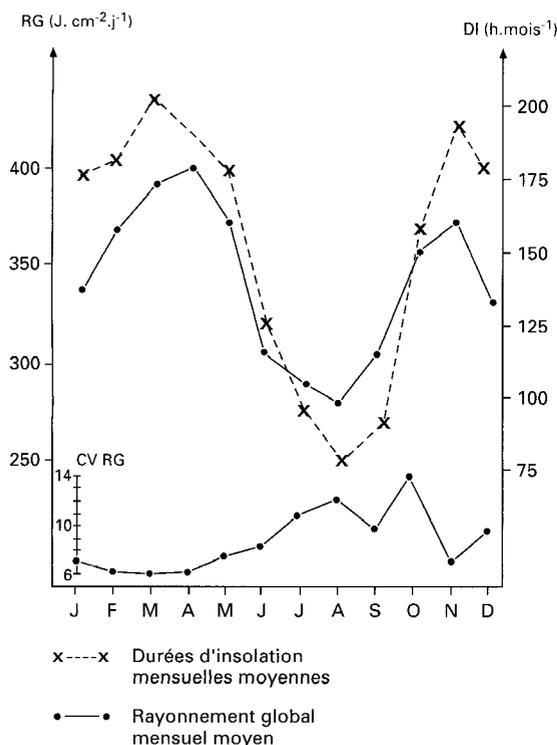


Figure 1
Durées d'insolation mensuelle moyenne de 1956 à 1979 ; rayonnement global mensuel moyen d'octobre 1967 à décembre 1979 à la station bioclimatologique d'Adiopodoumé. CV RG désigne le coefficient de variation interannuel des valeurs mensuelles du rayonnement global.

TEMPÉRATURE, VENT ET HUMIDITÉ DE L'AIR

Le tableau I récapitule les valeurs moyennes de **température** sous abri pour la période 1950-1979. La température moyenne annuelle est de 26,2 °C. L'amplitude annuelle est faible : 3,3 °C entre mars (27,7 °C) et août (24,4 °C). L'écart entre les moyennes mensuelles des températures maximales et minimales oscille entre 8,8 (janvier à mars) et 6,0 °C (juillet à septembre) (fig. 2).

À l'échelle interannuelle, la variabilité est faible ainsi que l'indiquent les coefficients de variation toujours inférieurs à 3 % (tabl. I). Les moyennes mensuelles maximales et minimales les plus élevées et les plus basses ont été respectivement observées en mars 1964 (35,2 °C) et en août 1956 (19,2 °C).

Les **vents** sont essentiellement de secteur sud-ouest. Pour la station de l'aéroport d'Abidjan (1956-1969), la fréquence des vents est à 46 % de secteur sud-ouest, 26 % de secteur ouest et 10 % de secteur sud. La vitesse annuelle est modérée : 1,37 m . s⁻¹ à Adiopodoumé pour la période 1966-1979. Les variations mensuelles des vitesses moyennes sont peu marquées : de 1,01 en décembre à 1,67 m . s⁻¹ en septembre, de même que la variabilité mensuelle interannuelle. Cependant le mois de mars (mois des tornades) est exceptionnel avec un coefficient de variation (CV) de 45 % alors que les CV pour les autres mois sont compris entre 5 et 15 %.

La tension moyenne annuelle de **vapeur d'eau** est de 28,7 hP correspondant à une humidité relative de 70 %. Toujours élevée au cours de l'année, l'humidité relative est maximale en juin, juillet et août et relativement plus faible de janvier à avril.

Notons ici que cette description moyenne cache un aspect fondamental de la variabilité car les écarts entre jours d'un mois donné peuvent être très importants. C'est le cas du vent, mais aussi du rayonnement et des précipitations. La conjonction, à très court terme, de gradients élevés pour ces facteurs peut expliquer les évolutions brusques des caractéristiques physiques du milieu lagunaire mais aussi de sa production photosynthétique (GUIRAL et CHANTRAINE, 1982).

En dehors de ces variations temporelles des paramètres climatiques de moyenne fréquence (jour) et de basse fréquence (mois), il existe des variations de type nyctéméral dont l'importance est déterminante

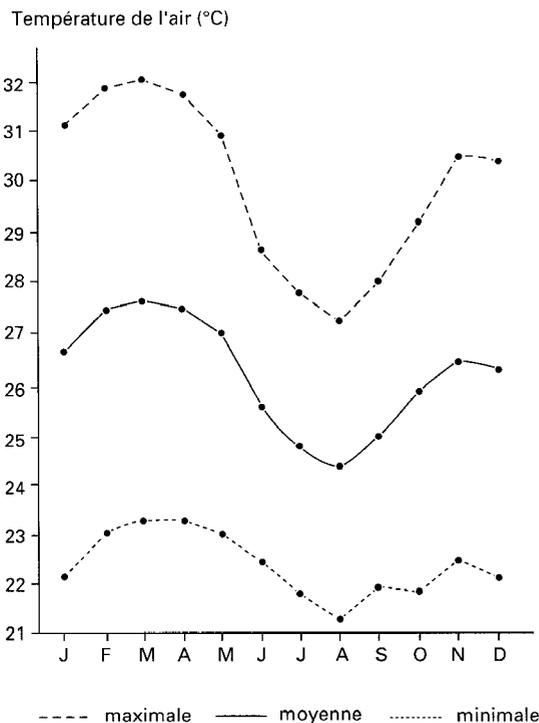


Figure 2

Températures mensuelles de l'air sous abri à la station bioclimatologique d'Adiopodoumé (1958-1979).

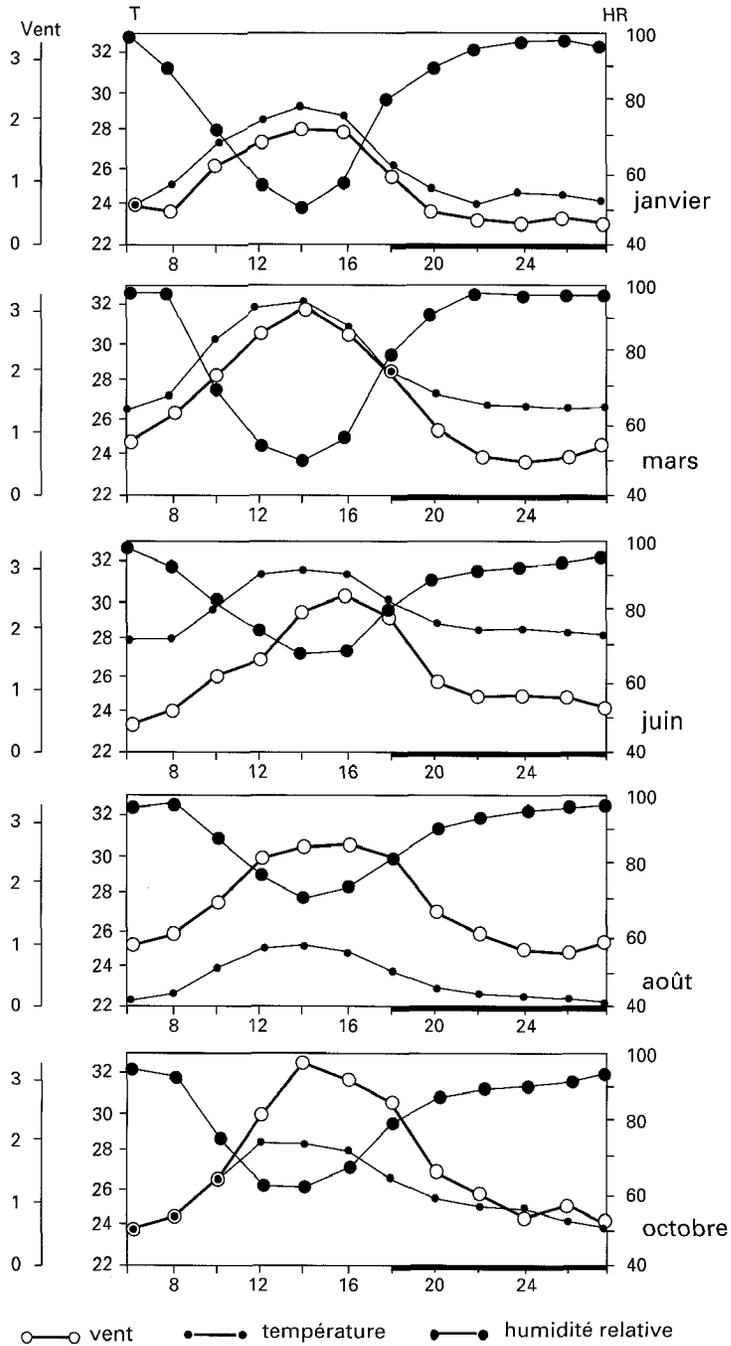


Figure 3

Variations journalières de la température ($^{\circ}C$), de la vitesse du vent ($m \cdot s^{-1}$) et de l'humidité relative de l'air (%) au cours des mois de janvier (grande saison sèche), mars (mois des tornades), juin (grande saison des pluies), août (petite saison sèche) et octobre (petite saison des pluies). Données de la station bioclimatologique d'Adiopodoumé.

dans le fonctionnement écologique (variation jour-nuit de l'éclairement) et hydrodynamique (rythme du vent) des milieux lagunaires. La figure 3 représente les variations horaires des températures, de la vitesse moyenne du vent et de l'humidité de l'air à la station d'Adiopodoumé. Quelle que soit la période et en dehors des variations mensuelles — dont les valeurs moyennes sont caractéristiques — il existe pour les

trois paramètres considérés des variations nyctémérales constantes de forte amplitude. D'une manière systématique, les évolutions des températures et des vents sont similaires et en opposition de phase avec les taux d'humidité de l'air. Il existe ainsi des variations jour-nuit très importantes (facteur compris entre 1,5 et 2,0 pour l'humidité et 3,0 à 5,0 pour le vent et cela selon les mois considérés). Elles sont caractérisées par des nuits à forte humidité relative, vent quasi nul et températures relativement plus basses et des jours où sont observés les maxima journaliers de température et de vent (entre 12 et 16 heures) et les minima d'humidité relative dont les valeurs varient entre 50 et 70 % au cours de l'année.

ÉVAPORATION

MONTENY et LHOMME (1980) donnent des valeurs d'évapotranspiration potentielle calculées d'après la formule de Penman pour la station d'Adiopodoumé entre 1968 et 1979 (tabl. I). La moyenne annuelle est de 1 356 mm (valeurs extrêmes 1 405 et 1 237 mm). Le cycle saisonnier est bien marqué (fig. 4) avec une évaporation moyenne mensuelle inférieure de 40 % en août (86,1 mm) à celle de mars (141,8 mm). La variabilité interannuelle des moyennes mensuelles est peu élevée (CV compris entre 5 et 10 %).

VARLET (1978) a calculé l'évaporation — pour la lagune Ébrié entre 1949 et 1954 — en évaluant les divers termes de l'équation de conservation de l'énergie (fig.4). Il avait distingué deux zones : d'une part, la partie de la lagune où les courants de marée sont notables et pour laquelle il faut tenir compte des pertes d'énergie liées à la différence de température entre les eaux lagunaires et les eaux marines et, d'autre part, les régions dessalées où l'influence des marées est beaucoup plus faible. Cette dernière zone s'étend à l'ouest de la digue de Jacquville (4° 15' W). Sur une année la différence entre ces deux parties de la lagune est appréciable : 1 179 mm à l'est et 1 307 mm à l'ouest et les écarts maximaux sont observés lorsque les eaux océaniques sont les plus froides : janvier et août-septembre. Ces différences régionales s'expliquent par une anomalie de la circulation des eaux (en particulier de la pénétration des eaux marines) entre les branches est et ouest de la lagune de part et d'autre du canal de Vridi (GALLARDO, comm. pers.).

Les écarts interannuels sont relativement faibles. De ce fait, les estimations obtenues par VARLET (1978) et MONTENY et LHOMME (1980) — et bien qu'il s'agisse de deux modes de calcul différents appliqués à deux périodes distinctes — sont relativement proches.

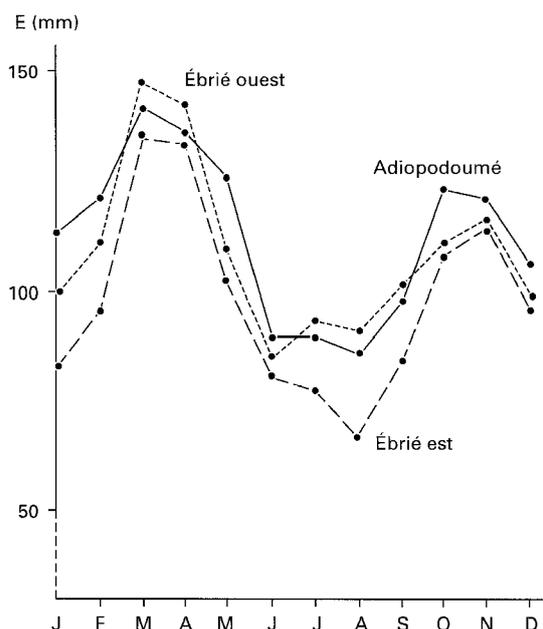


Figure 4
Variations saisonnières de l'évaporation en lagune
Ébrié : Ébrié ouest et Ébrié est (1949-1954)
d'après VARLET, 1978 ; Adiopodoumé (1968-1979)
d'après MONTENY et LHOMME, 1980.

PRÉCIPITATIONS

Les précipitations, liées au déplacement du front intertropical, atteignent les lagunes sous trois formes : eaux météoriques tombant directement sur le plan d'eau, eaux de ruissellement issues du bassin versant lagunaire *stricto sensu* et eaux fluviales correspondant aux fleuves dont les embouchures se situent directement en lagune. Ce dernier aspect sera abordé plus loin.

Par leur forte hétérogénéité spatiale, aux échelles petites et moyennes, les précipitations constituent un paramètre délicat à quantifier précisément. Il est nécessaire de multiplier les observations et d'opérer de nombreux recoupements pour obtenir une information fiable. Dans le cas qui nous intéresse ici, la situation est relativement favorable car le réseau d'observations météorologiques de l'Asecna en Côte-d'Ivoire est assez dense et installé, nous l'avons vu, depuis longtemps. Nous avons choisi la période 1950-1986, à la fois parce qu'elle coïncide avec celle des observations hydrologiques et parce qu'elle est suffisante pour garantir une représentativité satisfaisante des moyennes obtenues.

Au total 17 stations, suffisamment proches du réseau lagunaire (fig. 5), ont été retenues et cela même si leur répartition spatiale est irrégulière et si nous ne disposons pas toujours de toute la série temporelle souhaitée. La majorité de ces stations concernent la lagune Ébrié et plus particulièrement la région d'Abidjan, avec quatre stations principales : Abidjan aéroport et Abidjan ville ; Banco et Adiopodoumé et deux stations plus récentes : Abidjan Cocody (depuis 1963) et Abidjan port (depuis 1965). La partie ouest de la lagune Ébrié peut être suivie à partir des stations de Dabou et Mopoyem et, depuis 1964, par celle de Jacqueville située sur le littoral. Les précipitations dans la partie est de la lagune Ébrié peuvent être estimées à partir des stations de la Mé et de Bingerville (depuis 1956) et par quelques données plus récentes concernant Alépé et Grand-Bassam. Pour les deux autres lagunes, le réseau d'observations est plus lâche avec pour la lagune Aby deux stations (Adiaké et Assinie) auxquelles s'ajoute Aboisso, station plus éloignée. Pour la lagune de Grand-Lahou nous ne disposons que d'une seule station sur le littoral, à Grand-Lahou (fig. 5).

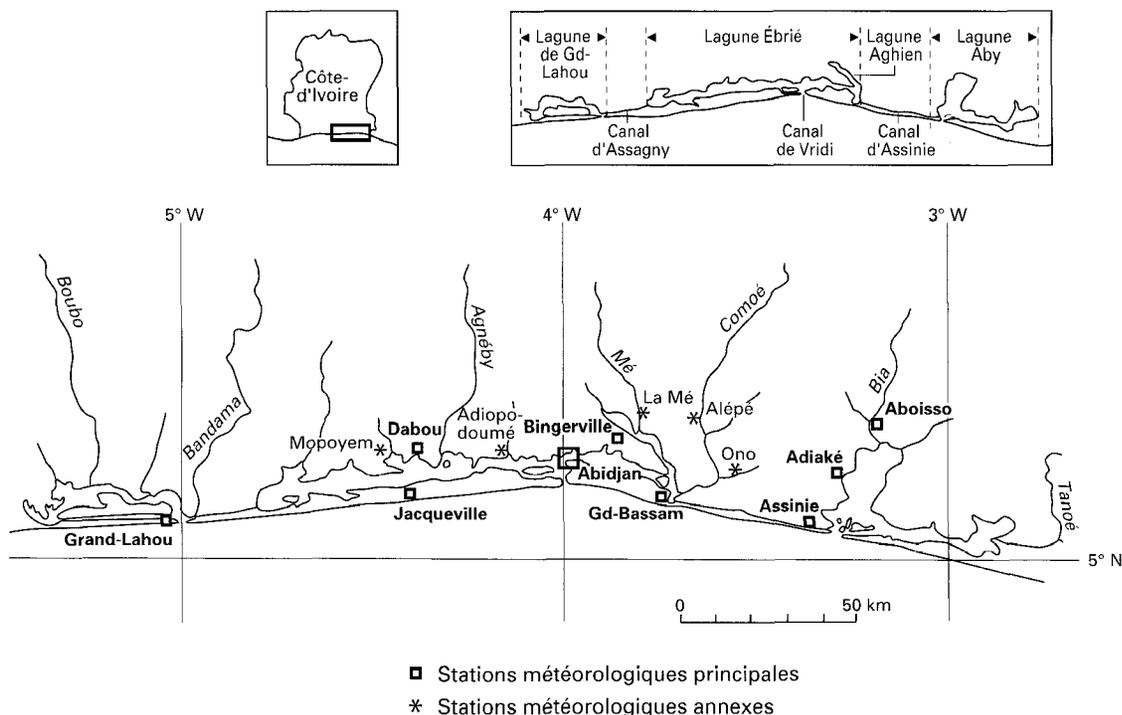


Figure 5
Domaine de la façade littorale ivoirienne.

Représentativité et valeurs moyennes

Pour une région lagunaire donnée, la représentativité des valeurs peut être analysée à partir des informations enregistrées par les diverses stations de la ville d'Abidjan. Les pluviogrammes moyens annuels sont pratiquement identiques pour Adiopodoumé et Abidjan aéroport (fig. 6). Les deux autres stations offrent des résultats analogues mais avec de très légers décalages correspondant respectivement à un excédent annuel moyen de 105 mm à la station du Banco et à un déficit de 85 mm pour Abidjan ville. Ces écarts, faibles mais significatifs, traduisent les variations d'ordre microclimatique qui affectent spécifiquement chaque station. Le pluviogramme moyen à Abidjan a donc été défini comme la moyenne des 4 stations pour lesquelles les données existent depuis 1950. Ainsi calculée, la moyenne annuelle des précipitations de 1950 à 1986 à Abidjan est de 2 020 mm.

Au cours de la période considérée, les évolutions des précipitations annuelles pour les diverses stations recensées à proximité et au sein de la ville d'Abidjan sont sensiblement identiques avec en général des valeurs souvent bien groupées (DURAND et CHANTRAINE, 1982). Il est ainsi possible de reconstituer une évolution moyenne des précipitations pour cette région (fig. 9) ⁽¹⁾.

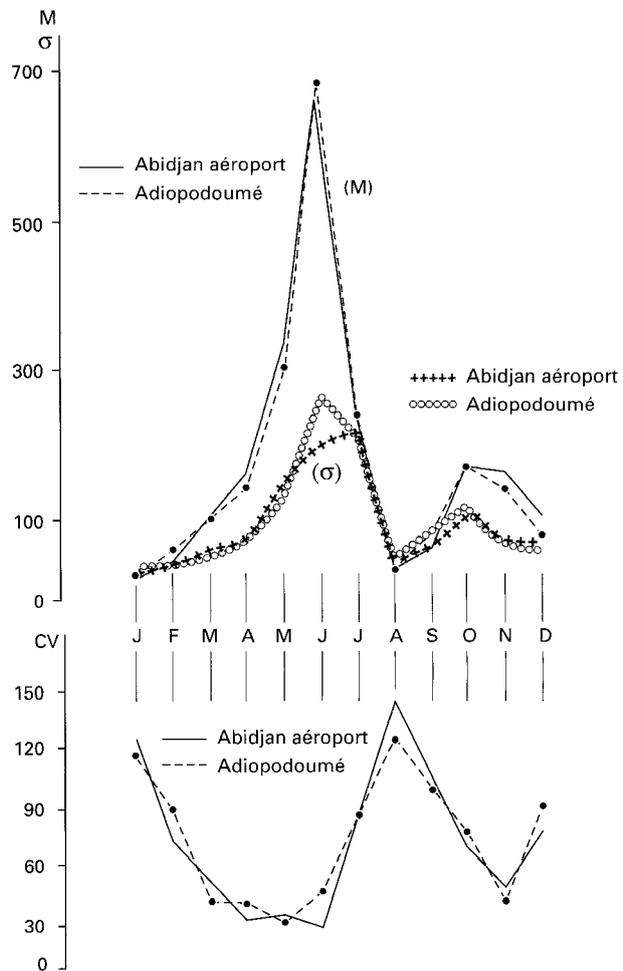


Figure 6

Variations saisonnières des précipitations aux stations d'Abidjan aéroport et d'Adiopodoumé (1959-1980) : moyenne (M) ; écart-type (σ) ; coefficient de variation (CV).

⁽¹⁾ Quatre stations jusqu'en 1965, puis les six stations citées jusqu'en 1978, et cinq de 1978 à 1986, la station d'Abidjan ville ayant disparu.

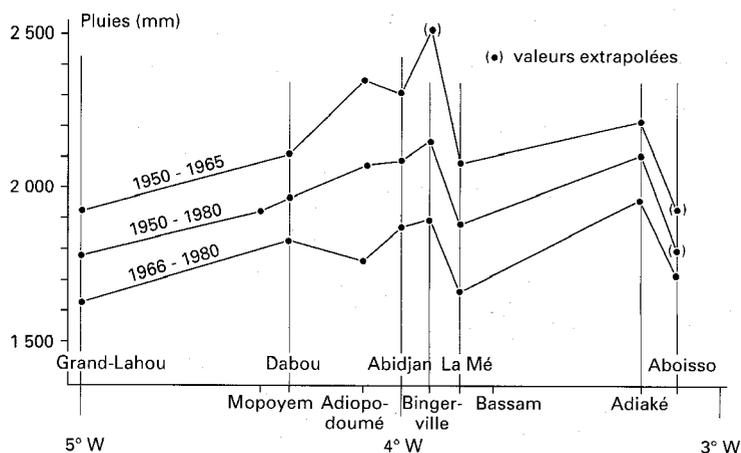


Figure 7
Précipitations annuelles moyennes
des stations du domaine lagunaire
pendant trois périodes de référence
entre 1950 et 1980.

À partir du pluviogramme moyen à Abidjan (fig. 6), il est possible de distinguer une première saison des pluies, de loin la plus importante, entre mai et juillet correspondant à près de 60 % du total annuel des précipitations. La seconde saison des pluies en octobre et novembre est bien marquée mais avec des précipitations nettement moins importantes représentant 15 % du total annuel. Si janvier et août sont les deux mois les plus secs, l'appellation de saisons « sèches » *stricto sensu* est impropre, car les périodes réellement sans pluie n'existent pas. La variabilité des précipitations mensuelles à l'échelle interannuelle est illustrée par leurs coefficients de variation (fig. 6). Les variations les plus importantes sont observées en janvier et août, mois de faibles précipitations alors que les périodes de forte pluviométrie (mai-juin, novembre) présentent une variabilité beaucoup plus faible. Il est intéressant de comparer le mois de mai à celui de juillet qui pour des précipitations moyennes équivalentes présente un coefficient de variation double. En effet, selon les années, le mois de mai peut appartenir soit à la grande saison des pluies, soit à la petite saison sèche. À précipitations sensiblement égales, on constate aussi comparativement au mois d'octobre une plus grande stabilité en novembre.

Il existe également des différences nettes entre les stations occidentales et orientales, les précipitations totales augmentant régulièrement de Grand-Lahou à Bingerville, l'écart entre les moyennes annuelles de ces deux stations dépassant 350 mm (fig. 7). Plus à l'est, on retrouve des valeurs relativement élevées pour Adiaké après un minimum marqué pour les stations de la Mé et d'Aboisso caractérisées par une situation plus septentrionale. La variabilité spatiale des pluviogrammes pour les stations du littoral est illustrée par la figure 8 où les écarts mensuels ont été calculés par rapport à la moyenne des stations d'Abidjan. Cette figure montre qu'il n'existe pas de concordance parfaite entre les pluviogrammes moyens des 5 stations comparées. Le fait le plus frappant est la pluviométrie de juin — et secondairement de juillet — beaucoup plus importante à Abidjan. Ce phénomène pourrait correspondre à un effet de site en liaison avec l'importance des activités urbaines.

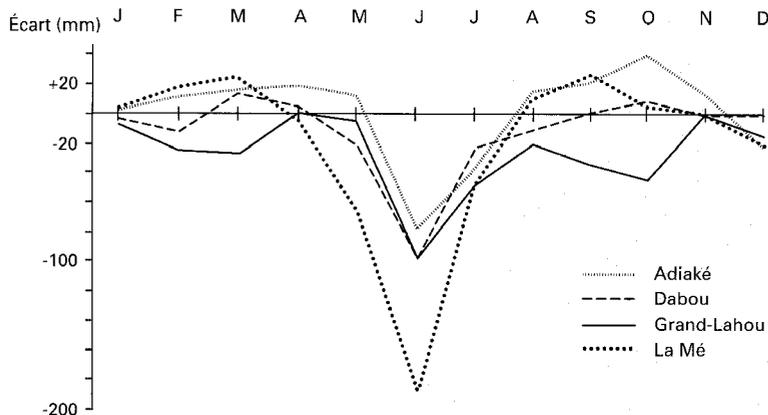


Figure 8
Variabilité spatiale, en
quelques stations du domaine
lagunaire, des moyennes
pluviométriques mensuelles
(1950-1980) représentées
par leur écart à la moyenne
d'Abidjan.

Variations interannuelles

La variabilité interannuelle pour une station donnée est très élevée. Dans la série des 36 années considérées il existe en effet un facteur 3 entre les valeurs minimales et maximales observées. En outre, pour deux années consécutives ces valeurs peuvent varier du simple au double, comme ce fut le cas d'Adiopodoumé en 1979 (2 145 mm) et 1980 (1 137 mm) ou celui d'Abidjan ville en 1976 (2 865 mm) et 1977 (1 436 mm).

La figure 9 représente les variations des précipitations annuelles pour quelques stations caractéristiques entre 1950 et 1986. Globalement, il existe des différences nettes entre certaines stations et les valeurs moyennes enregistrées à Abidjan. Par exemple, à Grand-Lahou les pluies sont souvent beaucoup plus faibles que dans toutes les autres stations (cas des années 1951, - 60, - 61, - 72, - 82, - 83). Cependant, malgré ces variations locales, deux remarques générales peuvent être dégagées :

- il existe des années à pluviométrie exceptionnelle, marquées dans toutes les stations, aussi bien par excès (1954, 1959, 1962, 1976) que par défaut (1958, 1977 et de 1983 à 1986) ;
- sans que l'on puisse vraiment parler d'évolution sur la série chronologique considérée, on relève néanmoins des tendances et, en moyenne, les années 1966-1986 sont plus sèches que celles de la période 1950-1965 (fig. 7). Quelles que soient les stations, les écarts entre ces deux périodes sont systématiques et peuvent dépasser 500 mm (stations du Banco et de Bingerville).

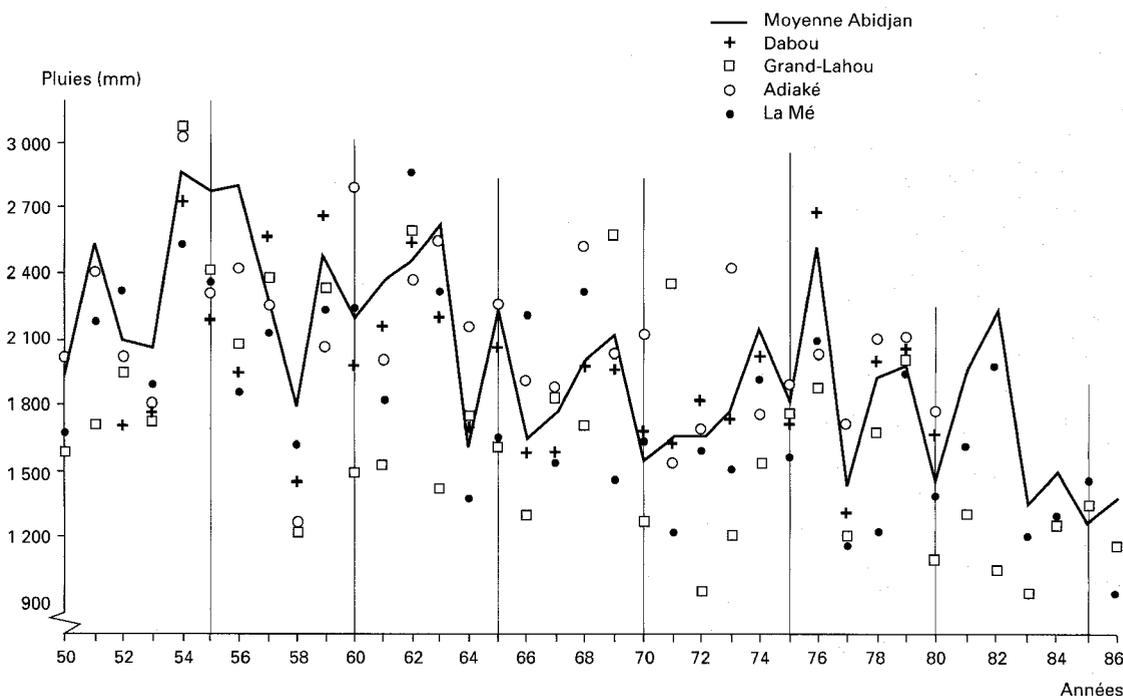


Figure 9

Variations interannuelles des précipitations en quelques stations caractéristiques entre 1950 et 1986.

Adiaké et Dabou ne sont plus suivis depuis 1981.

Hydrologie

Comme le démontre l'ensemble des études écologiques relatives aux écosystèmes aquatiques, l'hydrologie (et sa dynamique) constitue, par son caractère structurant et intégrateur, un facteur essentiel de leur analyse fonctionnelle. Cela est particulièrement évident dans le cas des milieux lagunaires qui correspondent à des écotones soumis aux doubles influences océanique et continentale.

Si, de ce point de vue, une analyse globale du système Ébrié n'a pu être réalisée à ce jour compte tenu de la complexité morpho-édaphique et des dimensions de cette lagune, un certain nombre d'informations sont cependant disponibles. En particulier, la salinité aisément mesurable et systématiquement associée aux études biologiques peut permettre en tant qu'élément conservatif d'estimer l'origine des masses d'eau lagunaires et leur degré de dépendance vis-à-vis des apports continentaux et océaniques. En outre, l'étude de ses variations temporelles et spatiales peut permettre de quantifier l'intensité des processus de diffusion par agitation turbulente. Localement, ces données ont été complétées par des informations sur l'hydrodynamisme conduisant à une description des phénomènes convectifs liés à la circulation des eaux. L'ensemble de ces éléments fournit ainsi globalement une bonne connaissance du devenir des masses d'eau en lagune Ébrié ainsi que des constituants chimiques et biologiques qui leur sont associés.

L'origine des eaux et l'importance de leurs flux d'entrée et de sortie déterminent la qualité et le taux de renouvellement des eaux lagunaires. Ces flux sont essentiellement représentés par des arrivées d'eaux fluviales à l'interface continent-lagune et par des entrées et sorties d'eaux marines à l'interface océan-lagune. Nous évoquerons successivement les marées et le niveau moyen du plan d'eau lagunaire, les apports fluviaux (apports les mieux connus et les plus variables). À partir de ces données une tentative d'établissement des bilans hydrologiques globaux sera présentée.

MARÉES ET NIVEAU MOYEN DU PLAN D'EAU

L'influence des marées est sensible sur l'ensemble des lagunes ivoiriennes mais elle s'amortit dès que l'on s'éloigne des estuaires. Seule la lagune Ébrié a été étudiée de ce point de vue avant la réouverture de Bassam en 1987 (VARLET, 1978 ; TASTET, 1979). D'une manière générale, le marnage diminue et le retard par rapport à la marée en mer augmente quand on s'éloigne du canal de Vridi à l'ouest comme à l'est. C'est ainsi qu'à l'embouchure de la Comoé, pour un marnage de 1 m en mer, la renverse se réalise avec un retard de 4 heures environ et la différence de niveau entre la hauteur maximale et minimale du plan d'eau lagunaire n'est que de 20 cm. En revanche, à l'ouest, au niveau de l'embouchure de l'Agnéby, alors que cette station occupe une position sensiblement symétrique par rapport au canal de Vridi, le retard ne serait que de 2 heures et le marnage de 8 cm. Ces différences traduisent deux types d'ondes distincts : onde progressive normale à l'est jusqu'à Bassam ; une onde stationnaire avec interférence entre l'onde incidente et l'onde réfléchie à l'extrémité ouest (VARLET, 1978) ⁽¹⁾. En réalité la propagation de cette onde stationnaire serait facilitée et rendue plus complexe par l'existence probable d'un phénomène de seiche. Les évolutions du marnage et du retard de renverse le long du bras ouest sont représentées sur la figure 10. Le minimum des marnages — de l'ordre de 6 à 7 cm —, coïncidant avec une augmentation des retards de plusieurs heures, se situe un peu avant l'Agnéby, à près de 40 km du canal de Vridi.

(1) Cette dissymétrie est en outre renforcée par l'existence d'une importante constriction qui ferme le bras est, comparativement à la large ouverture du chenal ouest. De ce fait, la pénétration saline est plus difficile et ce bras est soumis à un brassage moins important et donc à une stratification plus forte (GALLARDO, 1978). Cette stratification est en outre renforcée par une alimentation en eau douce plus importante et cela même en période d'étiage. Il existe ainsi une circulation différente dans ces deux bras particulièrement dans la couche de surface durant la période de jusant. Le chenal est montré en outre des anomalies de profils de vitesse résiduelle caractérisés par un mouvement vers l'amont dans la couche de surface et par un courant vers la mer dans la couche moyenne (qui assure l'essentiel de la circulation des eaux vers l'océan) et cela aussi bien lors du flot que du jusant. Des fluctuations rapides des apports fluviaux et le vent dominant de secteur sud-ouest, en s'opposant à la circulation vers la mer, peuvent être à l'origine de ces anomalies des profils de vitesse résiduelle dont la fréquence serait inférieure à celle de la marée semi-diurne. L'indice de Richardson tendant à diminuer lors de ces périodes d'anomalie, elles correspondent donc à des états de plus forte instabilité (GALLARDO, 1978). Le processus de déstabilisation initié dans la couche de surface contribue ainsi à maintenir une forte turbulence dans ce secteur. À l'opposé, dans le large bras ouest de la lagune, le vent facilite la circulation des eaux de surface vers l'océan, créant ainsi un facteur d'hétérogénéité supplémentaire entre les bras est et ouest de la lagune (LEHAY, 1984).

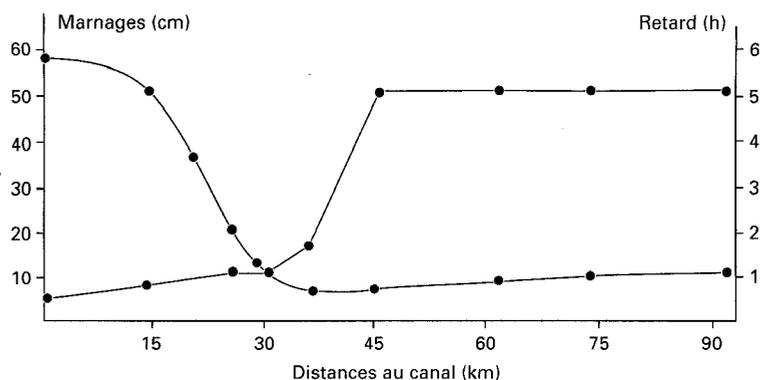


Figure 10

Marnages et phases observées dans l'onde stationnaire présente à l'ouest d'Abidjan en fonction de la distance (km) au canal de Vridi pour un marnage de 100 cm en mer (d'après VARLET, 1978).

À l'est du canal de Vridi, on observe aussi un amortissement sensible en lagune Potou car pour une amplitude de 1 m en mer le marnage à l'entrée (communication entre lagunes Ébrié et Potou) est de 37 cm avec un déphasage de 2 à 3 h par rapport à l'océan et de 21 cm avec un retard de 5 h 30 à la sortie (communication entre lagunes Potou et Aghien). En lagune Aghien, le marnage augmente uniformément de quelques centimètres et les heures de renverse sont partout en phase. Ce phénomène peut évoquer certains aspects d'une onde stationnaire mais aussi traduire l'influence hydrodynamique prépondérante de la marée. En effet, au cours du flot, les eaux du fleuve Comoé sont détournées vers le nord et pénètrent ainsi dans le système des lagunes Potou et Aghien (TASTET, 1979).

En lagune les courants dépassent souvent $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: les valeurs maximales, mesurées en surface, atteignent $2,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le canal de Vridi et $1,0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ à la digue de Jacquerville. À l'ouest de l'Agnéby, ils ne dépassent guère $0,1$ à $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

La variation annuelle du niveau de la lagune est appréciable, et reflète essentiellement les fluctuations des apports d'eau douce. La figure 11, d'après VARLET, donne les variations du niveau moyen en baie de Cocody en 1952 : l'amplitude annuelle dépasse 50 cm entre août, mois de niveau le plus bas et correspondant à l'upwelling côtier, et octobre, mois de niveau le plus élevé, lié à la crue de la Comoé. Un maximum secondaire net, 35 cm au-dessus du minimum d'août, se produit en juin lors de la grande saison

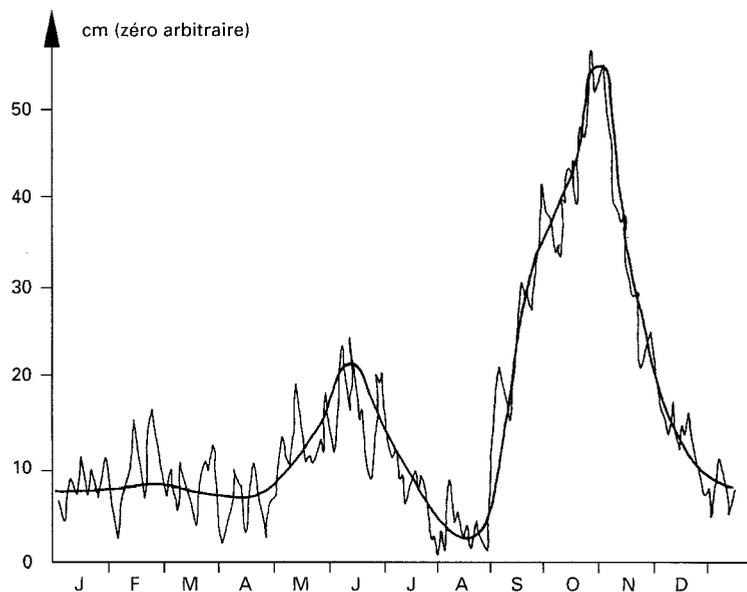


Figure 11
Variations du niveau moyen de la lagune Ébrié à Abidjan en 1952 (d'après VARLET, 1978).

des pluies. À l'échelle annuelle ces variations de niveau résultent donc de l'importance des apports d'eau continentale et des capacités d'évacuation de la lagune (limitées au seul canal de Vridi depuis sa création) qui dépendent du niveau moyen de l'océan. Compte tenu des cycles de marée, les niveaux de l'océan — et donc de la lagune dans les régions proches du canal de Vridi — sont tous deux affectés par des variations de haute fréquence correspondant aux alternances basse mer - haute mer et morte-eau - vive-eau (fig. 11). Ce cycle annuel est plus ou moins net selon les régions considérées. Par exemple, le maximum secondaire de juin doit être plus important à l'ouest de l'Agnéby car ce secteur n'est pas directement affecté par les eaux de la Comoé.

Aucune mesure, à notre connaissance, n'a été faite pour la lagune Aby et celle de Grand-Lahou. En lagune Aby, il est néanmoins probable que les variations de niveau sont considérables car l'exutoire d'Assinie est très réduit. On en trouve d'ailleurs un témoignage indirect dans le fait qu'au cours du mois de juin les pêcheurs ne peuvent plus exercer leur activité avec les mêmes engins de pêche.

LES APPORTS FLUVIAUX

La Côte-d'Ivoire est drainée dans le sens nord-sud par quatre grands fleuves. Ce sont, d'est en ouest, la Comoé, la Bandama, la Sassandra et le Cavally (fig. 12). Leur débit moyen annuel total était de l'ordre de $1\,900\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (d'après GIRARD *et al.*, 1971 ; données antérieures à 1967). Sur ce total, les deux grands fleuves intéressant le système lagunaire, Comoé et Bandama, représentaient en moyenne $700\text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ces dix dernières années leur contribution moyenne a été généralement très inférieure.

Cinq autres rivières se jettent dans les trois grandes lagunes : le Boubo en lagune de Grand-Lahou ; l'Agnéby et la Mé en lagune Ébrié ; la Bia et la Tanoé en lagune Aby. Elles ont en commun des bassins

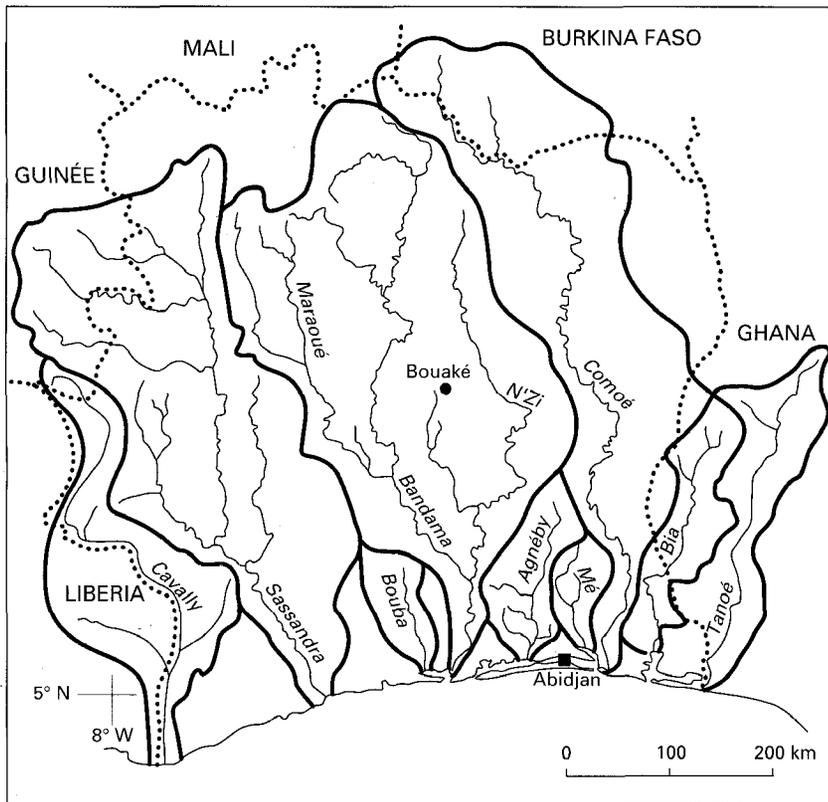


Figure 12
Bassins versants des principaux cours d'eau de Côte-d'Ivoire.

TABLEAU II

Caractéristiques moyennes des cours d'eau lagunaires en Côte-d'Ivoire. Les valeurs de débits moyens (D) et de volumes totaux écoulés (V) sont extrapolées à la surface totale du bassin (S). σ_D désigne l'écart-type interannuel, N le nombre d'années d'observations, et CV_D le coefficient de variation

Fleuves	Bandama	Comoé	Agnéby	Mé	Bia	Tanoé
S (km ²)	97 500	78 000	8 900	4 300	10 000	16 000
D (m ³ .s ⁻¹)	266	198	22	47	66	139
σ_D	185,4	135,2	16,3	23,4	66,0	139,0
CV_D	69,6	68,2	74,1	49,0	54,5	30,6
N*	31	31	23	23	29	23
V (10 ⁹ m ³)	8,4	6,2	0,7	1,5	2,1	4,4
Année	1957	1968	1968	1968	1964	1968
V max. (10 ⁹ m ³)	20,5	16,4	2,3	3,6	5,2	7,6
Année	1978	1983	1981	1977	1986	1958
V min. (10 ⁹ m ³)	2,0	0,8	0,1	0,6	0,8	1,8

* Période d'observation : 1956-1987, sauf pour la Mé et la Tanoé pour lesquelles les mesures s'interrompent respectivement en 1980 et 1978. Pour l'Agnéby la série est incomplète de 1956 à 1960 et de 1974 à 1978.

versants relativement réduits — 5 000 à 15 000 km² — et entièrement situés en zone forestière (domaine guinéen) (fig. 12). Le tableau II regroupe les principales caractéristiques des cours d'eau ayant leur débouché en lagune. Les valeurs de débit et de volume total écoulé ont été estimées à partir des données du Service hydrologique de l'Orstom, sauf pour la Tanoé dont le bassin versant est entièrement situé au Ghana (MENSAH, comm. pers.).

La situation des débouchés des fleuves en lagune explique une partie des variations spatiotemporelles de l'hydrologie et de l'hydrochimie des trois lagunes.

En lagune Aby, les eaux de la Bia au nord, et celles de la Tanoé, à l'extrême est, doivent traverser une grande partie du domaine lagunaire avant d'arriver au grau d'Assinie, ce qui constitue un facteur d'homogénéité spatiale.

Le cas de la lagune Ébrié est beaucoup plus complexe car la Comoé est complètement excentrée à l'est. Il existe de ce fait des différences fondamentales entre les régions orientales et occidentales, de part et d'autre du canal de Vridi. À l'est, la région située entre Grand-Bassam et Abidjan est entièrement balayée de septembre à novembre par la crue annuelle de la Comoé. Cette crue peut jouer un rôle à l'ouest jusqu'à la digue de Jacquévillie. À l'ouest de l'Agnéby, seules les précipitations locales et les eaux de ruissellement assurent un certain renouvellement des eaux. Une mention particulière doit être faite pour le diverticule de la lagune Aghien, dont les eaux sont douces et pour laquelle la Mé et son aire de progradation en lagune, mais aussi les eaux de la Comoé, constituent une barrière efficace contre les intrusions salines (fig. 5) ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Avec l'ouverture de la passe de Bassam de 1988 à 1990 cette description n'est plus valable : pendant l'étiage on assista à une intrusion d'eaux salines en lagune Aghien et dans le cours inférieur de la Comoé.

Pour la lagune de Grand-Lahou enfin, l'importance de la Bandama est telle, malgré le débouché excentré là aussi à l'est, que toutes les eaux lagunaires sont bouleversées lors de la crue du fleuve.

L'influence des précipitations est nettement prépondérante dans la définition des régimes hydrologiques des fleuves et rivières ivoiriens. Parmi les quatre types principaux décrits en Côte-d'Ivoire (GIRARD *et al.*, 1971) deux seulement nous intéressent ici, le régime tropical de transition et le régime équatorial de transition.

Le régime tropical de transition : il correspond aux fleuves dont le bassin versant se situe principalement dans la partie septentrionale de la Côte-d'Ivoire et donc dans une région de savane inégalement boisée. Ce régime comporte généralement une crue unique d'août à octobre, et une longue période de basses eaux de janvier à mai. La Bandama et la Comoé se rattachent à ce régime avec quelques nuances car elles subissent des influences multiples, en fonction de l'étendue de leur bassin versant et des régimes de leurs tributaires.

Le régime équatorial de transition : son domaine s'étend sur la partie méridionale de Côte-d'Ivoire où la végétation est du type forestier (secteur ombrophile du domaine guinéen). Ce régime est caractérisé par le dédoublement de la crue annuelle, qui correspond à la répartition saisonnière des précipitations dans le sud de la Côte-d'Ivoire. La première crue, généralement la plus forte, se situe en juin-juillet et la seconde en octobre-novembre. Les deux périodes de basses eaux ne sont pas homologues : en août-septembre il s'agit d'une « intercrue », pendant laquelle les débits mensuels représentent 8 à 9 % du total annuel (fig. 13), alors que de janvier à mars ils se réduisent à 1 ou 2 % en moyenne. Les cinq fleuves côtiers se rattachent nettement à ce type.

Les hydrogrammes de la figure 13 illustrent, en les nuancant, le cas des fleuves dont le débouché se situe dans une des trois grandes lagunes. Pour faciliter les comparaisons, les trois modules moyens sont exprimés en pourcentage du total annuel, accordant ainsi la même importance à chaque cours d'eau.

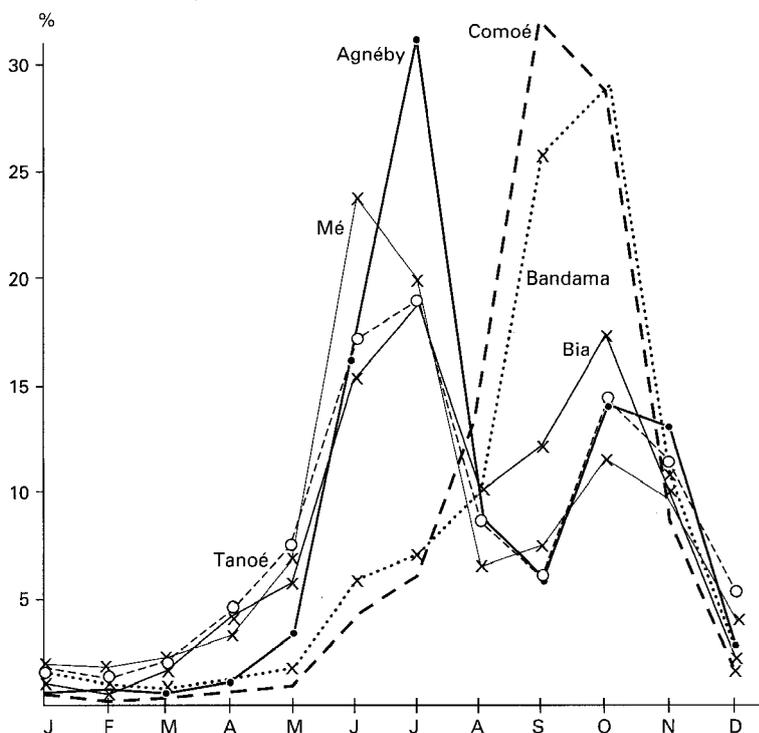


Figure 13

Hydrogrammes relatifs moyens des cours d'eau ayant leur exutoire dans le domaine lagunaire (en % du total annuel de chaque fleuve).

Des deux fleuves soudaniens, la Comoé accuse le régime le plus proche du type tropical : maximum accentué en septembre et octobre (61 % du total annuel) et étiage très marqué puisque de janvier à mai ne s'écoule en moyenne guère plus de 3 % du total annuel. L'hydrogramme moyen de la Bandama est très proche de celui de la Comoé, avec cependant une légère atténuation des écarts entre hautes et basses eaux. Cela correspond à la structure particulière des deux bassins d'alimentation et à l'importance relative des affluents de type équatorial et tropical.

S'agissant des fleuves côtiers, si l'on retrouve deux crues annuelles bien marquées, des différences significatives se manifestent d'un bassin à l'autre. En effet, la première crue peut dépasser la seconde, à l'instar de la Mé et, surtout, de l'Agnéby. Au contraire les crues peuvent être d'importance comparable comme celles de la Bia et, moins nettement, de la Tanoé. Le maximum de première crue se produit généralement en juillet, précédé par une hausse des débits dès juin. Lors de la deuxième crue, le maximum est atteint aux mois d'octobre et de novembre.

Les apports fluviaux annuels moyens aux trois lagunes s'élèvent à 9.10^9 m³ pour la lagune de Grand-Lahou (en tenant compte du Boubo), $8,4.10^9$ pour la lagune Ébrié et $6,5.10^9$ pour la lagune Aby. Si l'on fait abstraction du ruissellement direct et des petits bassins versants, les taux d'apports d'eau continentale par les fleuves guinéens (ou forestiers) varient très nettement pour les trois grandes lagunes de Côte-d'Ivoire, ces rapports étant en moyenne de 6 % pour la lagune de Grand-Lahou, 25 % pour la lagune Ébrié et de 100 % en lagune Aby (qui ne reçoit aucun fleuve d'origine soudanienne).

Les valeurs moyennes du tableau II recouvrent en fait une variabilité interannuelle considérable. En effet, les rapports entre les volumes annuels extrêmes écoulés sont de 10 pour la Bandama et de 20 pour la Comoé alors que pour les trois bassins côtiers orientaux (Mé, Bia, Tanoé) ces rapports sont compris entre 4 et 7. Avec un rapport de 20 et des coefficients de variation élevés (de 30 à 75 %), le cas de l'Agnéby paraît atypique. Mais les très faibles valeurs enregistrées pour ce fleuve au cours de la période 1981-1986 ne sont peut-être pas très fiables.

Il existe une très bonne corrélation entre les évolutions interannuelles des crues de la Bandama et de la Comoé, qui réagissent d'une manière identique aux variations des précipitations dans le centre et le nord de la Côte-d'Ivoire (fig. 14). Au cours des années 1960-1990, il est possible de distinguer nettement deux périodes situées avant et après 1970 (tabl. III). Pendant la dernière décennie les apports de la Comoé et de la Bandama sont en moyenne près de deux fois plus faibles que ceux enregistrés pour la période 1962-1970. Cette évolution générale est à mettre en relation avec la sécheresse qui a affecté l'Afrique au sud du Sahara. On peut remarquer en outre que pour 1971-1980 les débits moyens annuels des deux fleuves sont proches, alors qu'il existait auparavant un excédent annuel de près de $90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la Bandama. Cette diminution relative des débits de la Bandama est à mettre en relation

TABLEAU III
Variabilité interannuelle des débits moyens (D en $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) des fleuves lagunaires

	Période	D	σ_D	CV_D
Bandama	1962-1970	418,0	147,2	35,2
	1971-1980	170,6	72,8	42,7
Comoé	1962-1970	330,6	119,4	36,1
	1971-1980	161,5	68,2	42,2
Bia	1963-1970	77,0	37,2	48,3
	1973-1980	38,8	13,3	34,3
Mé	1963-1970	59,7	30,0	50,1
	1971-1980	33,0	9,5	28,8

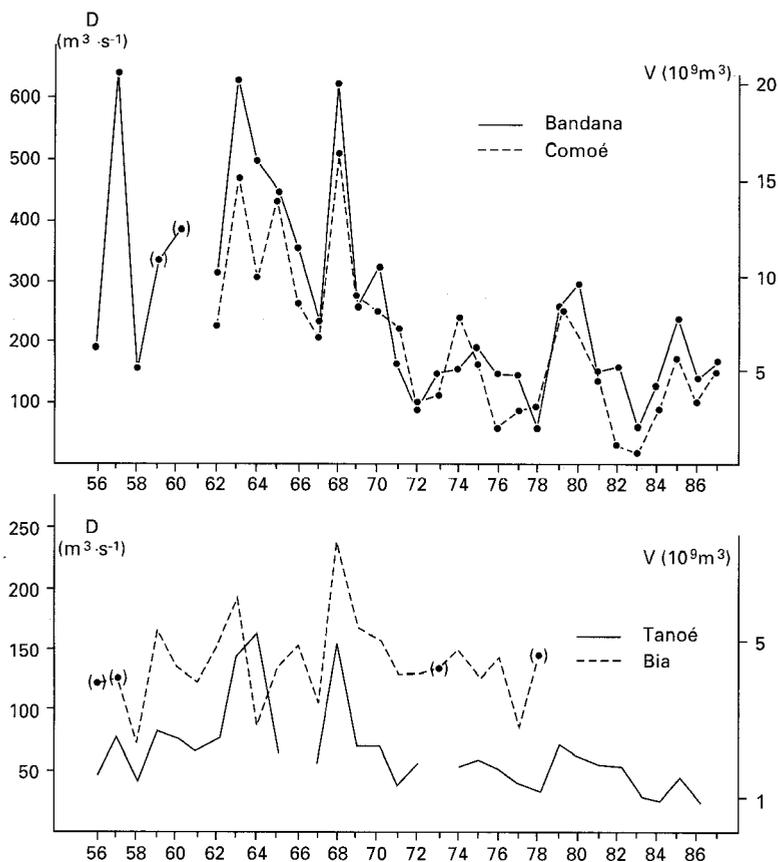


Figure 14

Variabilité interannuelle des crues des principaux cours d'eau débouchant dans le système lagunaire ivoirien (1955-1987). D désigne le débit annuel moyen, V le volume total écoulé (d'après les données Orstom et DRES).

avec la période de remplissage des barrages de Kossou et de Taabo et à plus long terme avec un accroissement probable des pertes d'eau par infiltration et (ou) évaporation consécutivement à ces réalisations. Cette analyse est confirmée pour les données les plus récentes (1981-1986) : alors que le débit moyen de la Bandama est équivalent à celui de 1971-1980, soit $155 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, celui de la Comoé n'est plus en revanche que de $110 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (soit trois fois moins que de 1962 à 1970).

Drainant les précipitations du sud de la Côte-d'Ivoire, les rivières côtières présentent aussi le même écart entre les années récentes et anciennes. Les apports par la Bia et la Mé sont en effet deux fois plus faibles entre 1970 et 1980 comparativement aux données antérieures. Ces diminutions traduisent une incidence jusqu'au rivage du golfe de Guinée de la sécheresse continentale qui a affecté l'Afrique au sud du Sahara. Cette tendance s'est encore accrue de 1981 à 1986 où les débits de la Bia, en moyenne de $18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, ne représentent plus qu'un quart de ceux de la période 1963-1970 !

En dehors de la période récente de sécheresse, il existe des années exceptionnelles où le contexte climatique général affecte aussi bien les bassins versants forestiers que ceux de la savane soudanienne. Ce fut le cas par exemple en 1968 où l'ensemble des apports fluviaux pour les trois lagunes aura été d'environ 53 milliards de mètres cubes contre 10 seulement en 1958.

D'un autre point de vue, le parallèle existant pour la période 1955 à 1986 entre les précipitations littorales et les débits des rivières forestières peut permettre une vérification supplémentaire des données hydrologiques et météorologiques.

Si l'on compare les modules moyens des fleuves soudaniens et guinéens, on peut introduire une distinction entre deux périodes types :

- les années « homogènes », pendant lesquelles les caractéristiques climatiques ont été analogues sur toute la Côte-d'Ivoire. C'est le cas le plus général, que ce soit par excès de pluies (1957, 1963, 1968) ou par sécheresse (1967, 1970-1975, 1977-1978, 1983-1986...);
- les années « hétérogènes » qui correspondent à des climats différents sur la côte et à l'intérieur du pays : grosses pluies au sud et pluies dispersées au nord (1956, 1962, 1976) et inversement (1964 à 1966).

Ces deux types dépendent évidemment de l'importance de la convergence intertropicale et de son rythme de déplacement saisonnier. On retrouve, à l'échelle de la Côte-d'Ivoire, les facteurs structurant l'hydroclimat mis en évidence par MAHÉ (1987) pour l'ensemble du golfe de Guinée.

BILANS HYDRIQUES

Faute de connaissances suffisantes sur les échanges entre océan et lagune, on ne peut faire une étude approfondie des flux aux interfaces. Il est cependant possible de définir des ordres de grandeur.

Variabilité interannuelle des apports d'eau douce

Si l'on peut considérer que les pertes par évaporation varient peu, les précipitations locales et les apports par les rivières peuvent être très différents. Dans le tableau IV nous avons récapitulé les divers termes pour les douze dernières années (1975-1986), pendant lesquelles des données sur les productions primaire, secondaire et terminale ont été récoltées. Durant cette période, la lagune Ébrié a reçu en moyenne 6,3 milliards de mètres cubes d'eau douce mais avec des écarts annuels très importants ($11,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ en 1979 contre $2,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ en 1983). Cette variabilité interannuelle est encore plus spectaculaire si l'on considère toute la période d'observation (tabl. II). En effet, il existe un facteur 10 entre le volume des apports minimaux de 1983 et maximaux de 1968 ($22,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$).

Au cours des douze années considérées (1975-1986), les apports d'eau douce en lagune Ébrié ont toujours été inférieurs à la moyenne générale (1957-1986) sauf en 1979. La variabilité reste cependant très élevée pendant cette période, le rapport du volume annuel au volume moyen (tabl. IV) est compris entre 1,81 (1979) et 0,37 (1983).

Bilans hydriques

Pour évaluer l'importance des échanges d'eaux marines, VARLET s'est placé dans le cas le plus simple d'une seule ouverture, celle du canal de Vridi⁽¹⁾. Aucune étude approfondie ne donne de résultats suffisamment précis pour que l'on puisse se risquer à chiffrer réellement le bilan hydrique mais VARLET a évalué, par des méthodes indirectes, le volume total annuel des sorties à $50 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ environ et celui des entrées à $38 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pour 1951-52. Le volume total de la lagune Ébrié, pour une profondeur moyenne proche de 4,8 m est d'environ $2,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$. Les apports moyens annuels d'eau douce représentaient presque quatre fois le volume total de la lagune entre 1956 et 1980 et trois fois environ entre 1980 et 1986 (tabl. II et IV) tandis que les entrées d'eaux marines représentent 14 fois ce volume. La lagune Ébrié constitue ainsi un milieu très bien renouvelé depuis l'ouverture du canal de Vridi. Bien entendu, cette approche globale recouvre une variabilité spatiale très importante. Et les taux de renouvellement des eaux sous influence marine, proches du type estuarien, sont incomparablement supérieurs à ceux des eaux des régions dessalées.

⁽¹⁾ C'est l'hypothèse la plus valable car la passe de Grand-Bassam s'est ensablée depuis l'ouverture du canal de Vridi et elle est restée pratiquement fermée au cours des vingt dernières années.

TABLEAU IV

Apports annuels d'eau douce (milliards de mètres cubes) à la lagune Ébrié de 1975 à 1986
 V désigne le volume total des apports annuels, VM le volume moyen des apports et ΔV le rapport des apports annuels à l'apport moyen interannuel égal à $6,3 \cdot 10^9 \text{ m}^3$
 On n'a pas tenu compte ici de l'évaporation — peu variable à l'échelle qui nous intéresse — et du ruissellement diffus

Année	Comoé	Agnéby	Mé	Précipitations ⁽¹⁾	V	ΔV
1975	5,1	(0,6) ⁽²⁾	(1,0) ⁽²⁾	1,0	7,7	1,22
1976	2,1	0,8	1,6	1,4	5,9	0,94
1977	4,2	(0,4) ⁽³⁾	0,6	0,7	5,9	0,94
1978	2,9	(0,6) ⁽³⁾	1,0	1,0	5,5	0,87
1979	8,3	0,6	1,4	1,1	11,4	1,81
1980	6,7	0,2	0,9	0,7	8,5	1,35
1981	4,5	0,1	(1,2) ⁽²⁾	1,1	6,9	1,10
1982	1,2	0,3	(1,2) ⁽²⁾	1,2	3,9	0,62
1983	0,7	0,1	(0,7) ⁽²⁾	0,8	2,3	0,37
1984	3,1	0,5	(0,6) ⁽²⁾	0,9	5,1	0,81
1985	6,0	0,4	(1,0) ⁽²⁾	0,7	8,1	1,29
1986	3,4	0,1	(0,6) ⁽²⁾	0,8	4,9	0,78
VM	4,0	0,4	1,0	0,9	6,3	

⁽¹⁾ À partir de la valeur moyenne d'Abidjan moins 100 mm. ⁽²⁾ Par rapport à la Bia en 1975 et de 1981 à 1986. ⁽³⁾ Par rapport à la Mé en 1977 et 1978.

Pour les autres lagunes, on ignore tout de l'importance réelle des échanges avec le milieu marin. En lagune de Grand-Lahou, la Bandama apporte — en année moyenne — un volume d'eau 17 fois plus important que le volume de la lagune. Le type estuarien continental domine donc, sauf pendant l'étiage du fleuve où il est atténué. En lagune Aby, on évalue les apports d'eau douce (tabl. II) à $2,1 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pour la Bia, $4,4 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pour la Tanoé, $0,35 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pour le ruissellement diffus, $0,9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ pour les précipitations, soit au total environ $6,7 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ par an. Le volume total de la lagune Aby s'établissant à $1,6 \cdot 10^9 \text{ m}^3$ environ, les apports d'eau douce lui sont plus de quatre fois supérieurs. Cependant, l'impact des eaux douces est beaucoup plus marqué en lagune Aby car les échanges avec la mer y sont plus limités. La section mouillée de la passe d'Assinie est en effet environ trois fois moins importante que celle du canal de Vridi (KOFFI, comm. pers.).

Grands traits physico-chimiques

Le contexte climatique général et en particulier les apports d'eaux continentales (météoriques et fluviales), l'influence biquotidienne des marées induisent les variations de nombreuses caractéristiques physiques et chimiques du milieu. Trois paramètres seront retenus ici : température des eaux, salinité et ions majeurs.

TEMPÉRATURE DES EAUX

La meilleure série de mesures de température des eaux lagunaires a été effectuée de 1938 à 1945, grâce aux trois cycles d'observations réalisées quotidiennement à Abidjan (fig. 15). On constate que les variations sont faibles, 3 à 4 °C au maximum pour les moyennes mensuelles : 31,2 °C en avril et 27,4 en août après la grande saison des pluies. Ces mesures réalisées antérieurement à l'ouverture du canal

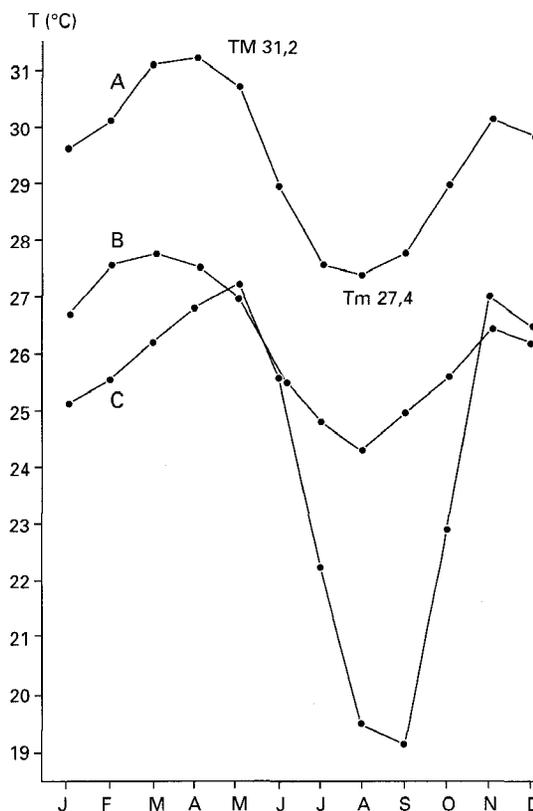


Figure 15

Variation annuelle de la température de l'air et de l'eau dans la région de la lagune Ébrié.

A : eau de surface à Abidjan (moyenne 1938-1945) ;
 B : air sous abri à Adiopodoumé (moyenne 1950-1979) ;
 C : mer : station côtière à - 10 m (moyenne 1969-1975).

(A) d'après VARLET, 1978 ; (B) d'après MONTENY et L'HOMME, 1980 ; (C) d'après BINET, 1977.

de Vridi sont toujours représentatives des températures superficielles des eaux en dehors de la région estuarienne de la lagune Ébrié. Au cours des études écologiques réalisées ultérieurement, les valeurs extrêmes observées sont de l'ordre de 25,5 et 34 °C (PAGES *et al.*, 1979 ; TASTET, 1974).

Les mesures concomitantes de la température de l'air et de l'eau ont montré que la lagune est constamment plus chaude (2 à 3 °C) que l'air. La température minimale s'aligne sur la température maximale de la mer à Port-Bouët (fig. 15) ⁽¹⁾.

La variabilité spatiale des températures de surface est faible et ne dépasse guère 3 °C d'une extrémité à l'autre de la lagune. Seules les eaux sous influence marine sont significativement plus fraîches. Par rapport au chenal central, on note aussi un léger refroidissement dans les baies. Ce phénomène est encore accentué lorsque ces fonds de baie correspondent aux débouchés de rivières dont les eaux sont en général plus froides que les lagunes. Le gradient vertical n'est jamais accentué, sauf en saison des crues dans la zone estuarienne où il peut dépasser 6 °C. Cette stratification est liée à la présence simultanée en profondeur d'eaux froides marines issues d'upwellings et en surface d'eaux chaudes dessalées correspondant à un mélange d'eau lagunaire et d'eau de crue des fleuves (PAGES *et al.*, 1979 ; ARFI *et al.*, 1989).

En lagune Aby, les variations thermiques sont analogues (CHANTRAINE, 1980) : valeurs maximales en février (30 à 31 °C) et minimales en juin (26 à 28 °C). Dans les zones profondes de la lagune une stratification nette s'installe en saison des pluies et de crue puis disparaît en saison sèche et d'étiage.

Sans négliger le rôle possible des variations thermiques journalières, il ressort que les processus biologiques dépendent davantage des températures moyennes annuelles (de l'ordre de 29 °C) que de leur variabilité spatiotemporelle. Il est en revanche possible que des variations météorologiques brutales (vents, pluies...) interviennent d'une manière déterminante à très petite échelle (GUIRAL et CHANTRAINE, 1982).

⁽¹⁾ D'où l'intérêt d'utiliser la lagune comme source chaude pour le projet de centrale thermique des mers, projet lié au site très favorable d'Abidjan, qui bénéficie de la proximité du canyon du « Trou-sans-Fond ».

SALINITÉ

Les salinités des eaux lagunaires résultent globalement de l'origine des apports et dépendent à l'échelle locale (dans le temps et l'espace) de l'importance et du rythme des entrées d'eau dans le système lagunaire. De ce fait, les paramètres climatiques qui déterminent ces flux se trouvent aussi contrôler les salinités observées en lagune. Ces salinités sont par ailleurs modifiées par la morphologie et la bathymétrie qui créent des gradients halins verticaux pouvant être très marqués localement. Ces zones caractérisées par une stratification verticale résultent d'un mélange insuffisant des eaux océaniques et continentales. L'hydrodynamisme correspond dans ce cas à un écoulement superficiel d'eau moins salée (dont le sens général va de la lagune vers l'océan) et à un écoulement sous-jacent d'eau plus salée dont le sens et la vitesse sont fonction des niveaux respectifs de la lagune et de l'océan. On observe au-dessus des fosses les stratifications verticales les plus marquées caractérisées par des vitesses nulles des eaux salées profondes et par un écoulement des eaux de surface dont la vitesse est modulée par la marée. Ces situations sont rencontrées en lagune Ébrié dans le secteur sous influence marine, de part et d'autre du canal de Vridi.

En lagune Ébrié, le maximum de salinité se situe dans la région du port d'Abidjan, soumise à un renouvellement constant des eaux par le canal de Vridi. Entre 4 et 20 mètres de profondeur, la salinité est généralement (hors les périodes de crue et de précipitations) supérieure à $20 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Le gradient vertical et la variabilité saisonnière, à l'ouest comme à l'est, s'atténuent en fonction de l'éloignement avec le canal de Vridi.

La figure 16 représente les variations saisonnières de la salinité de surface pour six stations régulièrement réparties d'ouest en est dans le chenal central en 1975 (d'après PAGES *et al.*, 1979). D'un point de vue climatique, cette année est caractérisée par une petite saison sèche marquée et par une crue de la Comoé assez faible (module de l'ordre de $150 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ au lieu de 224 en moyenne, entre 1956 et 1980) (cf. tabl. II). Dans la région d'Abidjan (station 3), la salinité de surface reste très élevée, de janvier à avril (20 à $30 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). Elle diminue ensuite très rapidement avec la saison des pluies pour atteindre 2 à $0 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ de juin à septembre.

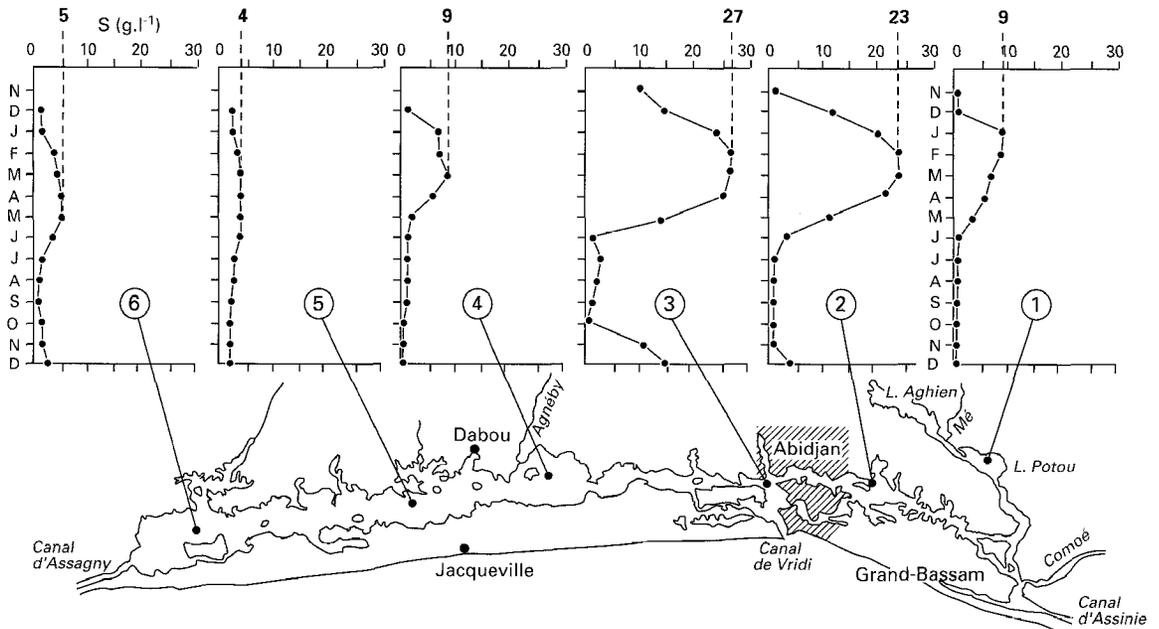


Figure 16
Variations annuelles de la salinité en six stations du chenal central de la lagune Ébrié en 1975
(d'après PAGES *et al.*, 1979).

À l'ouest d'Abidjan (stations 4, 5 et 6), les salinités sont toujours faibles et inférieures à $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Il existe cependant un contraste net entre les régions les plus occidentales et la station 4. À l'ouest de Dabou, les salinités restent comprises entre 2 et $5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ durant tout le cycle annuel. Il n'y a jamais de gradient vertical de salinité dans ces régions. À la station 4, en revanche, la salinité augmente nettement à l'étiage (8 à $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$) et l'adoucissement ultérieur est dû tout à la fois aux crues de l'Agnéby et aux précipitations.

À l'est d'Abidjan (station 2), l'allure du profil annuel diffère totalement de ce que l'on observe à l'ouest : l'évolution de janvier à juin est identique à celle observée dans la zone centrale, sous influence marine, mais l'influence de la Comoé devient ensuite prépondérante et la salinité reste proche de $0 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ jusqu'à la fin de l'année. Comme dans la région ouest, proche d'Abidjan, un gradient vertical peut apparaître en saison sèche dans des zones profondes isolées du reste du système lagunaire par l'existence de hauts-fonds (cas de la baie d'Abou-Abou).

En lagune Potou (station 1), l'influence de l'intrusion saline est sensible en saison sèche, tout en restant modérée, et l'eau est douce de mai à décembre. En lagune Aghien, l'eau est toute l'année quasi exclusivement d'origine continentale. Cette oligohalinité est gouvernée par les crues de la Mé et de la Comoé et par la bathymétrie (hauts-fonds de la lagune Potou correspondant à la zone de progradation de la Mé).

Cette description générale concerne principalement le chenal central, les baies reproduisant ces variations avec retard et amortissement (VARLET, 1978). Cependant des particularités locales dues à la morphologie (baies à « seuil ») ou à l'influence très localisée d'arrivée d'eaux douces sont nombreuses.

En lagune de Grand-Lahou on peut distinguer deux régions. La région orientale présente une forte instabilité annuelle puisqu'elle est soumise à la fois aux apports océaniques par la passe de Grand-Lahou et à la crue de la Bandama. Dans la région occidentale, en revanche, l'influence de ces apports est très amortie. Au cours d'un cycle annuel, la salinité dans cette région évolue de 10 à $3 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ contre 25 à $0 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le secteur oriental.

En lagune Aby, les salinités de surface ne sont élevées que dans une zone restreinte influencée par la marée et proche de l'ouverture d'Assinie. Partout ailleurs, la salinité de surface est faible (eaux oligohalines comprises entre 0 et $5 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). L'influence marine est maximale en saison sèche et crée un gradient horizontal depuis le delta jusqu'aux embouchures des fleuves (de 0 à $10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la salinité de surface). Ce gradient s'affaiblit au fur et à mesure de la saison des pluies et en octobre la lagune est parfaitement homogène et dessalée en surface (CHANTRAINE, 1980). Les eaux profondes où existe une forte stratification permanente ont une salinité toujours comprise entre 18 à $22 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$. Elles sont en outre anoxiques et riches en sulfures.

Pour les trois systèmes lagunaires étudiés, la variabilité interannuelle de la salinité résulte du volume annuel des apports d'eau continentale et météorique. Faute de données sur l'ensemble de la lagune, il nous est impossible ici de l'illustrer systématiquement, mais il est certain qu'elle peut être importante. Dans la région de Layo (station 4), par exemple, on a pu observer pour une même saison des différences de plusieurs grammes par litre d'une année sur l'autre, ce qui n'est pas sans conséquences possible pour l'aquaculture (cf. IV-4). Si la variabilité spatiale des précipitations est négligeable à l'échelle considérée, l'influence des variations interannuelles est d'autant plus marquée que les régions considérées sont plus soumises aux apports fluviaux.

IONS MAJEURS

Les concentrations en cations majeurs : sodium, calcium, potassium et magnésium, représentent pondéralement sur l'ensemble de la lagune Ébrié respectivement $77,4$, $17,7$, $4,3$ et $0,6$ % de la charge cationique totale. À partir d'analyses réalisées sur l'ensemble de la lagune, il est possible de déterminer avec une bonne approximation les charges cationiques des diverses eaux à partir de leur seule concen-

TABLEAU V
Paramètres des régressions linéaires entre les concentrations en chlorures et celles des cations majeurs en lagune Ébrié

	Na ⁺	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺
Coefficient de corrélation	0,994	0,999	0,997	0,997
Pente	0,864	0,039	0,020	0,034
Abscisse à l'origine	3,292	0,027	-0,554	0,034

tration en ions chlorures (tabl. V, d'après GUIRAL et FEHRI, 1988) ; la concentration en chlorures étant elle-même très fortement corrélée avec la salinité : $S \text{ (g} \cdot \text{l}^{-1}) = 0,067 \cdot \text{Cl}^{-} \text{ (meq} \cdot \text{l}^{-1})$; ($r = 0,998$). Cependant ces extrapolations, si elles sont possibles pour l'ensemble des eaux lagunaires, sont plus particulièrement adaptées aux secteurs à forte influence océanique ($S > 10 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). Pour les eaux oligohalines et a fortiori typiquement continentales (lagunes Aghien et Ono), ces extrapolations à partir des chlorures et (ou) de la salinité ne sont possibles que pour les ions Mg⁺⁺, Ca⁺⁺ et Na⁺. En effet, la concentration des ions K⁺ ramenée à la chlorinité de ces eaux est deux fois supérieure à celle déterminée pour les eaux océaniques prélevées devant Abidjan. Sur l'ensemble du milieu lagunaire Ébrié, nous disposons donc de deux traceurs hydrochimiques : les chlorures pour les eaux océaniques et les ions potassium pour les eaux continentales.

L'importance des apports en ions majeurs par le milieu océanique ne permet pas de confirmer une modification des concentrations ioniques par évaporation bien que les temps de résidence des masses d'eau soient spatialement très variables. Ce temps de séjour des masses d'eau est fonction de l'éloignement géographique des sites lagunaires par rapport aux zones de contact de la lagune avec les milieux adjacents (canal de Vridi pour les apports océaniques ; embouchures des fleuves pour les apports continentaux). En outre, cet éloignement géographique est modulé par l'hydrodynamisme lagunaire, instantanément (modes de propagation distincts des influences océaniques pour les secteurs estuariens à l'est et à l'ouest du canal de Vridi) et saisonnièrement (intrusion fluviale plus ou moins intense en fonction des variations saisonnières des débits fluviaux). Cette évaporation plus ou moins longue — et donc plus ou moins importante — que l'on ne peut déceler à partir des charges ioniques a pu cependant être mise en évidence par l'étude des rapports isotopiques de l'oxygène, O¹⁸/O¹⁶ (GUIRAL et FEHRI, 1988). En effet, à composition ionique équivalente, le degré d'enrichissement en O¹⁸ des eaux a permis de déterminer indirectement le temps de séjour des masses d'eau dans le milieu lagunaire.

La composition ionique des eaux lagunaires pour tous les ions qui ne présentent pas d'interférences avec le monde vivant correspond à un simple mélange d'eau océanique plus ou moins diluée par des eaux douces dont les concentrations ioniques peuvent être en première approximation considérées comme nulles (à l'exception des ions K⁺ pour les eaux plus oligohalines). Il ne semble donc pas exister de phénomènes de régulation chimique des compositions des eaux lors de leur transit en milieu lagunaire. Cela peut être la conséquence du faible confinement général de ce milieu très ouvert aux influences et aux apports extérieurs (continentaux et océaniques).

La situation est très différente pour les ions susceptibles de transformation ou d'immobilisation biologique qui présentent en milieu lagunaire des cycles complexes liés à la coexistence de strates oxygénées et anoxiques. Les meilleurs exemples concernent les ions silicates, les formes minérales de l'azote et du phosphore (cf. III-2), les ions métalliques (fer, aluminium) mais surtout les sulfates qui ont fait l'objet d'études approfondies (cf. II-8).

Le cycle climatique influe directement et indirectement sur l'écosystème lagunaire. La définition de « saisons lagunaires » est la résultante des saisons « terrestres » et des saisons « marines ». À cette succession temporelle moyenne vient s'ajouter une stratification spatiale fondée initialement sur des critères morphologiques mais dont les grandes lignes ont pu être confirmées *a posteriori* par des études ioniques et isotopiques.

SAISONS TERRESTRES

L'évolution moyenne des caractéristiques climatiques présentées ci-dessus (tabl. I et Précipitations) montre l'existence, plus ou moins marquée, de deux périodes de maxima annuels de précipitations que l'on peut découper en quatre saisons et caractériser de la façon suivante.

Grande saison sèche

De début décembre à la fin février, les précipitations sont faibles (60 mm par mois en moyenne) avec un minimum en janvier. La couverture nuageuse est en général faible avec une bonne visibilité à l'exception de quelques jours, voire quelques semaines, en janvier lors de la période d'harmattan. Les valeurs de la plupart des paramètres augmentent du début à la fin de cette saison et culminent au mois de mars (vent de $1,0$ à $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$; rayonnement solaire de $1\,492$ à $1\,910 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{j}^{-1}$; température de l'air de $26,3$ à $27,7^\circ\text{C}$; évapotranspiration de $106,8$ mm en décembre à $141,8$ en mars).

De début mars au 15 mai, une période de transition s'installe avant la grande saison des pluies. Cette période est caractérisée par une augmentation des précipitations correspondant à des averses de type orageux. La tension de vapeur d'eau est maximale alors que les valeurs de tous les autres paramètres tendent à décroître.

Grande saison des pluies

Du 15 mai au 15 juillet les précipitations sont très abondantes, presque continues (1 100 mm en 2 mois en moyenne), et culminent au mois de juin. Le rayonnement solaire diminue très nettement (de 30 % de mai à juillet) ainsi que la température de l'air (de $27,0$ à $24,8^\circ\text{C}$) et l'évaporation (- 25 %).

Petite saison sèche

Du 15 juillet au 30 septembre les pluies sont rares et faibles (41 mm en août). Le ciel est uniformément gris, ce qui correspond à une insolation et des températures minimales. L'évaporation conserve des valeurs basses. La vitesse du vent réamorçait une remontée qui culmine en septembre ($1,7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$).

Petite saison des pluies

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

SAISONS MARINES

Au-dessus du plateau continental ivoirien, les facteurs déterminant la hauteur de l'océan entraînent l'apparition de différents types d'eaux permettant la définition des saisons marines ⁽¹⁾. Elles ont été décrites devant Abidjan par MORLIÈRE (1970) et MORLIÈRE et REBERT (1972). D'après ces auteurs, on peut distinguer quatre saisons principales.

⁽¹⁾ Trois grands types d'eaux interviennent : les eaux dites « océaniques », de surface et profondes, et les eaux guinéennes.

Petite saison froide

Fin décembre début janvier, on observe devant Abidjan une résurgence d'eau océanique froide (24-25 °C) et salée (plus de 35 g . l⁻¹). Cette résurgence qui débute à l'ouest du pays intéresse progressivement, avec des intensités variables dans l'espace et selon les années, toute la Côte-d'Ivoire (ARFI *et al.*, 1991).

Grande saison chaude

Au cours des mois de mars à mai, des eaux océaniques issues du large s'installent devant la Côte-d'Ivoire. Leur température oscille entre 27 et 28 °C avec une salinité proche de 35 g . l⁻¹.

Grande saison froide

De juillet à octobre, la Côte-d'Ivoire est affectée par un fort upwelling dont l'intensité maximale est située devant le Ghana. La salinité des eaux marines côtières est alors toujours proche de 35 g . l⁻¹ avec une température inférieure à 23 °C.

Petite saison chaude

En novembre-décembre, des eaux guinéennes chaudes (28 °C) et dessalées (35 g . l⁻¹) viennent recouvrir celles de l'upwelling.

La figure 17A représente les valeurs moyennes de la température et de la salinité à la station côtière d'Abidjan à - 10 m entre 1966 et 1978. Les caractéristiques des eaux superficielles suivent une évolution analogue avec des valeurs moyennes légèrement supérieures de 1 à 2 °C pour la température et inférieures de 0,5 à 1,0 g . l⁻¹ pour la salinité. On voit que le phénomène majeur se produit entre juillet et octobre avec des températures particulièrement basses et des salinités élevées. Il serait alors plus justifié de considérer deux grandes périodes : froide de juillet à octobre et chaude le reste de l'année, cette dernière période pouvant être marquée par un refroidissement plus ou moins bref en décembre-janvier. L'intérêt de ce schéma est confirmé par le diagramme T.S. (fig. 17B) où l'on a reporté les valeurs mensuelles moyennes de la période 1966-1978 relevées à - 10 m en face d'Abidjan. Les mois d'août et de septembre apparaissent très distinctement détachés alors que de novembre à juin les variations de température et de salinité sont faibles. Les mois de juillet et octobre constituent des transitions entre la saison froide et la saison chaude.

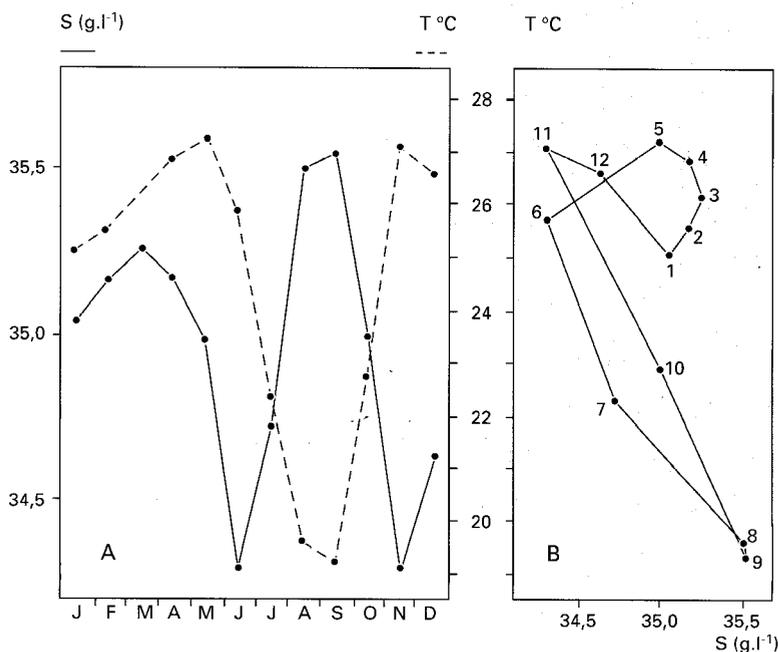


Figure 17
 A : Valeurs moyennes (1966-1978) de la température et de la salinité de la mer à la station côtière d'Abidjan à 10 m de profondeur ;
 B : diagramme correspondant T (°C) - S (mg . l⁻¹).
 D'après MORLIÈRE, 1970.

Si elles sont sensibles pour l'océanographe, les variations de salinité des eaux côtières sont tout à fait insignifiantes dans le contexte lagunaire. C'est beaucoup plus par leurs variations saisonnières de température et de niveau et secondairement par leur richesse nutritive et leur transparence que les eaux marines influent sur l'écosystème lagunaire. En relation avec les dimensions du canal de Vridi, ce rôle est surtout manifeste pour la lagune Ébrié dans la zone estuarienne et principalement lors de l'établissement des upwellings. Bien que beaucoup plus intense que celle de janvier (MORLIÈRE, 1970), la résurgence qui s'installe à partir des mois de juin-juillet a relativement peu d'impact sur le fonctionnement estuarien. Ce paradoxe apparent a deux origines :

- La situation hydroclimatique du milieu lagunaire lors de ces deux événements est très différente. La résurgence de janvier se produit au cours d'une période d'apports continentaux très faibles qui débute avec la fin de la crue de la Comoé (novembre) ; en revanche, celle de juin-juillet coïncide généralement avec une période de très fortes précipitations. L'arrêt temporaire des apports continentaux en août permet une augmentation de la salinité des eaux de surface en lagune, mais ce phénomène est de trop courte durée pour être comparable à ce qui est observé en janvier.
- Le niveau moyen de l'océan, bas lors des séquences de remontée (VERSTRAETE et PICAUT, 1983), conduit à un réajustement des niveaux hydrodynamiques des deux milieux via le canal de Vridi. Cette baisse du niveau océanique, particulièrement marquée de juin à septembre, se traduit au cours du mois d'août par une forte vidange de la lagune qui présente alors son niveau minimal (VARLET, 1978). Ainsi, la propagation de l'influence océanique par le jeu des marées en milieu lagunaire est bien moins importante en août qu'en janvier.

Dans ces conditions, l'upwelling de forte intensité observé de juin à septembre ne conduit pas à un affaiblissement du gradient de densité suffisant pour entraîner l'oxygénation temporaire des eaux profondes anoxiques piégées au sein des dépressions des baies estuariennes. À l'opposé, ce phénomène majeur pour le fonctionnement lagunaire peut se réaliser sous l'influence de la résurgence de janvier, et cela malgré sa faiblesse relative, grâce à la conjonction d'événements d'ordre climatologique et hydrologique rendue possible par la situation d'interface du milieu lagunaire (cf. III-2).

On peut considérer que la variabilité interannuelle est faible mais, en revanche, la variabilité saisonnière est notable et joue un rôle appréciable pour le secteur estuarien — autour et à l'est d'Abidjan — directement influencé par l'intrusion des eaux marines via le canal de Vridi. Cette variabilité saisonnière des entrées d'eau océanique est cependant moins importante que celle des apports d'eau douce : fleuves surtout, et précipitations.

SAISONS LAGUNAIRES

En fonction de ce qui précède, on peut considérer schématiquement trois saisons pour la zone Ébrié.

- **Saison sèche** (de janvier à avril) : les apports continentaux, qu'il s'agisse d'écoulements ou de précipitations, sont négligeables. L'évaporation est maximale et l'influence marine prépondérante. Températures et salinités atteignent leur niveau le plus élevé. C'est aussi l'époque des gradients de densité les moins marqués.
- **Saison des pluies** (de mai à août) : époque des plus fortes précipitations puis des apports des rivières forestières, la température atteint sa valeur minimale.
- **Saison des crues** (de septembre à décembre) : l'arrivée des eaux des fleuves drainant le nord de la Côte-d'Ivoire bouleverse certaines régions lagunaires qui présentent alors des salinités de surface proches de zéro. À cette période les gradients verticaux sont les plus marqués et caractérisés par la superposition d'une eau continentale et d'une eau profonde plus salée piégée au sein des dépressions de la zone estuarienne.

Ce découpage général devrait être adapté en fonction de leur spécificité pour les autres écosys-

tèmes. C'est ainsi que, pour la lagune Aby, la troisième saison ne peut être définie comme ci-dessus puisqu'il n'y a pas de fleuve « soudanien ». Il s'agit plutôt dans ce cas d'une deuxième saison des pluies qui cumule précipitations et deuxième crue de la Bia et de la Tanoé (crues plus marquées que celles des fleuves côtiers alimentant la lagune Ébrié).

L'HÉTÉROGÉNÉITÉ SPATIALE

En préalable aux recherches bioécologiques, il a été nécessaire de structurer l'écosystème en strates plus homogènes et donc plus faciles à étudier. La stratification spatiale adoptée a été fondée sur la morphologie générale des lagunes et l'importance et la disposition de leurs zones d'échange avec les milieux continentaux et marins. Dans le cas de la lagune Ébrié — qui est tout à la fois la lagune la plus modifiée par l'homme et la plus hétérogène — deux caractéristiques essentielles sont à l'origine de la zonation établie :

- **Le canal de Vridi** : il s'inscrit à l'aplomb d'Abidjan et, contrairement à la passe de Bassam, il correspond à une ouverture pérenne et vaste qui permet une influence de la marée au moins par ses effets mécaniques, avec retard et amortissement jusqu'aux extrémités est et ouest du système Ébrié. Notons que le canal de Vridi est deux fois plus distant du canal d'Assagny (qui correspond à l'extrémité ouest de la lagune Ébrié) que de l'ancienne passe de Bassam (qui coïncide avec l'extrémité orientale) créant ainsi une certaine dissymétrie entre les branches est et ouest de la lagune (fig. 18).
- **Les apports d'eaux continentales** sont constitués pour les deux tiers de ceux de la Comoé. Ce fleuve débouche à l'extrémité orientale de la lagune, renforçant ainsi la dissymétrie spatiale déjà notée précédemment. En outre, les fluctuations très importantes du volume de la crue contribuent à une forte variabilité interannuelle.

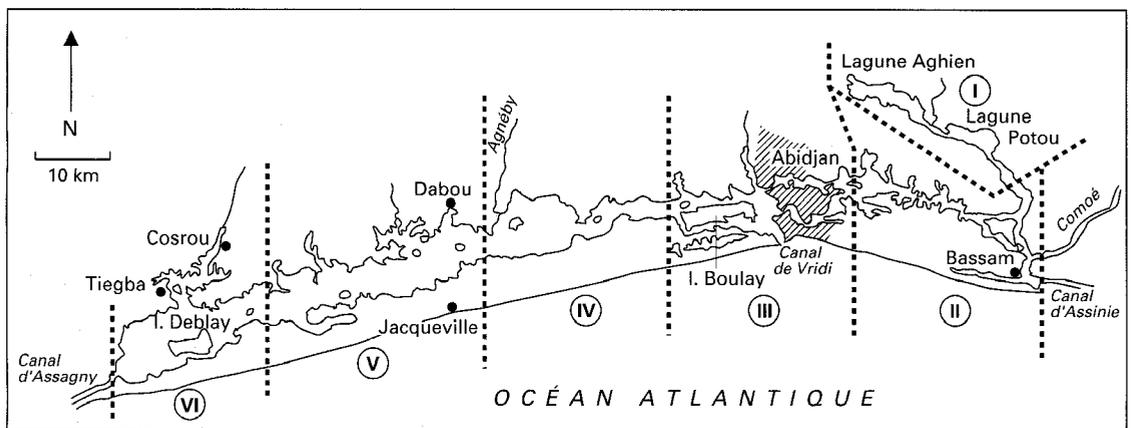


Figure 18
Les six secteurs de la lagune Ébrié.

Ces deux traits dominants, associés à la morphologie très allongée du système et à l'existence de deux rivières à régime équatorial, permettent déjà d'effectuer une première zonation, uniquement basée sur des critères morphologiques et hydrologiques :

- de l'Agnéby à la Comoé, régions « estuariennes » soumises à l'influence marine ; il ne s'agit pas d'un ensemble homogène, la zone estuarienne proprement dite étant celle d'Abidjan ; les deux zones adjacentes ont chacune leur caractère propre : à l'ouest d'Abidjan l'influence de la Comoé est très atténuée par rapport à la région orientale qui constitue un prolongement du fleuve durant les mois de crue ;

- de l'Agnéby au canal d'Assagny, zones *a priori* beaucoup plus stables et oligohalines car l'influence marine y est très amortie et les apports d'eau douce réduits aux précipitations ;
- le diverticule des lagunes Aghien et Potou enfin qu'il faut considérer séparément : leurs eaux sont soustraites aux influences marines et ont un caractère fluvial car renouvelées périodiquement par les crues.

Cette classification préliminaire se retrouve évidemment quand on prend aussi en compte la salinité des eaux. Elle est présentée sur la figure 18. Par commodité, on a distingué six secteurs : trois d'entre eux sont nettement estuariens ; les trois autres plus continentaux et oligohalins.

Le secteur III est le secteur estuarien type, directement soumis à la marée ; on y trouve en toute saison des gradients verticaux de salinité plus ou moins marqués : l'eau de surface passe de 2 à 30 g . l⁻¹ au cours de l'année. Il faut distinguer un sous-secteur, celui constitué par les eaux polluées de l'agglomération d'Abidjan, pollution particulièrement marquée dans les baies fermées. De part et d'autre, les secteurs II et IV présentent des caractères analogues, mais atténués : les variations saisonnières de salinité restent appréciables, les courants de marée sont encore très sensibles et les gradients verticaux peuvent être encore nets. Le secteur II est caractérisé par une instabilité saisonnière très marquée puisqu'il est balayé d'août à novembre par la crue de la Comoé. Entre Mé et Comoé, la lagune Potou constitue un sous-secteur intermédiaire d'eaux peu profondes encore sensible à la marée et très dépendant des apports fluviaux. La partie occidentale du secteur IV doit être considérée, elle aussi, comme un sous-secteur particulier soumis à l'influence des crues de l'Agnéby et caractérisé par une propagation des variations de niveau océanique plus rapide (RAMANY, 1980).

Les trois secteurs les plus éloignés de la mer (régions continentales oligohalines) ont comme caractéristique commune une relative stabilité. De même que l'Agnéby marque à l'ouest la frontière entre secteur estuarien et secteur continental, la Mé constitue à l'est la limite entre eaux douces et eaux saumâtres (fig. 18). La lagune Aghien est en effet douce ou presque toute l'année, même en profondeur, alors que les secteurs V et VI sont oligohalins, mais différent par la morphologie et la bathymétrie.

Une analyse identique conduit à des distinctions analogues pour les deux autres grandes lagunes. La lagune de Grand-Lahou a un caractère général plus estuarien, alors qu'en lagune Aby c'est le caractère oligohalin et continental qui l'emporte.

Cette division de la lagune Ébrié en six secteurs doit être considérée comme une hypothèse de travail, de caractère schématique. Si les résultats présentés dans la deuxième partie de l'ouvrage ont utilisé cette zonation *a priori*, ils ont aussi servi à la critiquer et nous verrons en fin d'ouvrage (cinquième partie) dans quelle mesure ce premier découpage s'est avéré robuste et ce qui doit en être conservé.

Il reste à garder présent à l'esprit, une fois cette stratification spatiale effectuée, que la variabilité interannuelle qui dépend essentiellement des apports continentaux en module les frontières. Le tableau VI présentant les taux de renouvellement en fonction des apports d'eaux douces annuels pour les six secteurs de la lagune Ébrié permet deux observations importantes :

- Il est possible de distinguer en fonction des taux de renouvellement moyen deux groupes. D'une part, des secteurs fortement dépendants des apports fluviaux et à très fort renouvellement (secteurs II, III et moins nettement secteur IV et lagune Potou). D'autre part, la lagune Aghien et les secteurs V et VI pour lesquels les taux de renouvellement sont beaucoup plus faibles et exclusivement dépendants des précipitations.
- La variabilité interannuelle est forte quel que soit le secteur considéré, minimale pour Aghien (amplitude de variant de 1 à 3) et maximale pour le secteur V (amplitude comprise entre 1 et 11) ⁽¹⁾.

Cette variabilité interannuelle contribue à la structuration et au fonctionnement des biocénoses et doit en modifier la productivité. Les conséquences ne sont pas nécessairement aussi spectaculaires que celles enregistrées lors des quelques mortalités massives de poissons observées, mais elles sont susceptibles

⁽¹⁾ DUFOR (1982) avait calculé des taux de renouvellement moyens pour les années 1960-1980 : ceux-ci sont deux fois plus importants que pour la série considérée dans le tableau VI, ce qui traduit l'aggravation de la sécheresse ces dernières années.

TABLEAU VI
Variabilité interannuelle des taux de renouvellement globaux en fonction des apports d'eau douce
pour les six secteurs de la lagune Ébrié

Secteurs	I		II	III	IV	V	VI
	Log. A.	Log. P.					
Surface (km ²)	20	22	62	71	86	170	135
Volume (km ³)	0,113	0,028	0,34	0,54	0,21	1,03	0,46
1975	0,33	36	19	12	4,2	0,22	0,27
1976	0,56	57	11	7	6,7	0,47	0,53
1977	0,22	21	14	9	2,4	0,08	0,13
1978	0,34	36	12	8	4,3	0,23	0,28
1979	0,39	50	29	18	4,6	0,28	0,33
1980	0,23	32	23	14	1,5	0,08	0,12
1981	0,39	43	17	11	2,2	0,27	0,33
1982	0,47	43	7	4,4	3,7	0,36	0,42
1983	0,20	25	4	2,5	0,9	0,06	0,11
1984	0,26	21	11	7	3,1	0,13	0,17
1985	0,18	36	21	13	2,2	0,04	0,09
1986	0,22	21	12	8	1,0	0,08	0,12
moyenne	0,32	35	15	9	3,1	0,19	0,24

Mode de calcul
— On considère ici que chaque secteur reçoit aussi les apports continentaux des secteurs amont : le secteur IV reçoit les apports de V et VI, Potou ceux d'Aghien, etc. En pratique, les seules valeurs modifiées significativement sont celles de IV et V.
— On tient compte des précipitations annuelles (valeur moyenne d'Abidjan) en intégrant les bassins versants secondaires (ADOU, 1973), de l'évaporation (valeurs de VARLET pour les bras ouest et est), des volumes fluviaux annuels écoulés par la Comoé, la Mé et l'Agnéby.

néanmoins de remettre en cause des interprétations fondées exclusivement sur une description moyenne de l'écosystème. La variabilité interannuelle peut être estimée indirectement à partir de la variabilité des apports d'eaux douces, précipitations et crues, qui font l'objet d'observations permanentes de la part de services météorologiques et hydrologiques. Mais elle devrait aussi être appréciée directement par des observations permanentes des eaux saumâtres, basées sur les mesures des paramètres physiques, chimiques et biologiques les plus classiques. Cette nécessité devient d'autant plus impérieuse que les interventions humaines deviennent plus prononcées, et ce sous de multiples aspects. Une telle surveillance permanente des lagunes permettrait donc aussi de caractériser l'évolution de la qualité des eaux éventuellement modifiées par les grands travaux — fluviaux et lagunaires — et par la pollution croissante, qu'elle soit d'origine rurale ou urbaine. C'est une des conditions nécessaires à un aménagement rationnel de ces eaux riches (cf. notre dernier chapitre). La création récente (1988) d'un Réseau national d'observation de la qualité des eaux lagunaires et marines (RNO) répond bien à ce besoin. On demande beaucoup, et à de nombreux points de vue, aux milieux lagunaires, ils méritent donc un effort exceptionnel qui passe par la connaissance de leur fonctionnement et la concertation des utilisateurs.

Leur sauvegarde en dépend.

- ADOU (A.), 1973.— Étude hydrogéologique du continental de la région d'Abidjan. Connaissances acquises. Rapport SODEMI, Abidjan.
- ARFI (R.), GUIRAL (D.) et TORRETON (J.P.), 1989. — Cycle hydrologique annuel d'une baie lagunaire eutrophe : la baie de Biétri (Lagune Ébrié, Côte-d'Ivoire). *Rev. Hydrobiol. trop.*, 22 (4) : 263-273.
- ARFI (R.), PEZENNEC (O.), CISSOKO (S.) et MENSAH (M.), 1993.— Évolution spatio-temporelle d'un indice caractérisant l'intensité de la résurgence ivoiro-ghanéenne. In : P. Le Lœuff, É. Marchal, J.B. Amon Kothias (éd.), Environnement et ressources aquatiques de Côte-d'Ivoire. I- Le milieu marin. Paris, Orstom : 111-122.
- Asecna.— Bulletins climatologiques mensuels.
- BINET (D.), 1977.— Contribution à la connaissance du zooplancton néritique ivoirien. Écologie descriptive et dynamique. Thèse Univ. Paris-VI. Paris, Orstom, 282 p.
- BUDYKO (M.I.), 1958.— The heat balance of the earth's surface. Trad. U.S. Weather Bureau, Leningrad 1956, 255 p.
- CHANTRAINE (J.M.), 1980.— La lagune Aby (Côte-d'Ivoire) : morphologie, hydrologie, paramètres physico-chimiques. *Doc. Sci. Centre. Rech. Océanogr. Abidjan*, 11 (2) : 39-37.
- DUFOUR (P.), 1982.— Les frontières naturelles et humaines du système lagunaire Ébrié. *Hydrobiologia*, 94 : 105-120.
- DURAND (J.R.) et CHANTRAINE (J.M.), 1982.— L'environnement climatique des lagunes ivoiriennes. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 15 (2) : 25-113.
- ELDIN (M.), 1971.— Le climat. In : Le milieu naturel de la Côte-d'Ivoire. *Mém. Orstom*, 50 : 72-108.
- GALLARDO (Y.), 1978.— Assymetry and anomalies of circulation and vertical mixing in the branching of lagoon-estuary. *Hydrodynamics of estuaries and fjords*. Elsevier, *Oceanography Ser.* : 197-206.
- GIRARD (G.), SIRCOULON (J.) et TOUCHEBCEUF (P.), 1971.— Aperçu sur les régions hydrologiques. In : Le milieu naturel de Côte-d'Ivoire. *Mém. Orstom*, 50 : 109-156.
- GUIRAL (D.) et CHANTRAINE (J.M.), 1982.— Hypothèses sur l'origine des mortalités observées en lagune Ébrié en 1979. *Arch. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 14 (2) : 61-95.
- GUIRAL (D.) et FEHRI (A.), 1988.— Caractérisation ionique et isotopique d'un système hydrologique tropical : la lagune Ébrié (Côte-d'Ivoire). *Oceanologica acta*, 12 (1) : 47-55.
- LEHAY (D.), 1984.— Système lagunaire Ébrié (Abidjan, Côte-d'Ivoire). Synthèse des données, modélisation de la courantométrie, dispersion. *Mém. DEA Océanographie physique*, Univ. Brest, 111 p.
- MAHÉ (G.), 1987.— Étude de la variabilité des apports hydriques continentaux dans le golfe de Guinée, en liaison avec son hydrologie océanique de surface. *DEA Hydrologie*, Univ. Orsay/Orstom, 103 p.
- MONTENY (P.A.) et LHOMME (J.P.), 1980.— Données climatiques recueillies à la station Orstom Adiopodoumé (1948-1979). Orstom Adiopodoumé, 31 p.
- MORLIÈRE (A.), 1970.— Les saisons marines devant Abidjan. *Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 1 (2) : 1-15.
- MORLIÈRE (A.) et REBERT (J.P.), 1972.— Étude hydrologique du plateau continental ivoirien. *Doc. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 3 (2) : 1-30.
- Orstom-DRES.— Annuaire hydrologiques de Côte-d'Ivoire. Abidjan.
- PAGES (J.), LEMASSON (L.) et DUFOUR (P.), 1979.— Éléments nutritifs et production primaire dans les lagunes de Côte-d'Ivoire. Cycle annuel. *Arch. Sci. Centre Rech. Océanogr. Abidjan*, 5 (1) : 1-60.
- RAMANY (B.P.), 1980.— Le système lagunaire Ébrié en Côte-d'Ivoire : fonctionnement hydrodynamique et salinité. Thèse Doct. ing. Univ. Abidjan, 247 p.

- TASTET (J.P.), 1979.— Environnements sédimentaires et structuraux quaternaires du littoral du golfe de Guinée (Côte-d'Ivoire, Togo, Bénin). Thèse Doct. État, Univ. Bordeaux-I, 181 p.
- VARLET (F.), 1978.— Le régime de la lagune Ébrié, Côte-d'Ivoire. Traits physiques essentiels. Paris, *Trav. Doc. Orstom*, 83, 162 p.
- VERSTRAETE (J.M.) et PICAUT (J.), 1983.— Variations du niveau de la mer, de la température de surface et des hauteurs dynamiques le long de la côte nord du golfe de Guinée. *Océanogr. Trop.*, 18 (2) : 139-162.