

PROJET MEDRAP-FAO

SEMINAIRE REGIONAL  
"AQUACULTURE ET ENVIRONNEMENT"

PATRAS - 21 - 30 avril 1986

---

HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE  
DU DOMAINE PARALIQUE

---

MILLET Bertrand  
ORSTOM - MONTPELLIER  
(France)

---

Cette rapide présentation, qui inaugure le séminaire, se situe d'emblée dans une optique plus pédagogique que strictement expérimentale, et se propose les deux objectifs suivants :

- Décrire progressivement les principaux types d'études physiques actuellement disponibles et raisonnablement applicables sur le domaine paralique, essentiellement estuarien et lagunaire, tout en soulignant leur importance relative par rapport aux méthodes descriptives biologiques et biogéochimiques complémentaires.

- Indiquer les termes dans lesquels se situe désormais la recherche fondamentale et finalisée en matière de couplage des études physiques et biologiques, dans le but d'accéder à des simulations de plus en plus réalistes du fonctionnement écologique d'un milieu littoral récepteur, avant et après aménagement aquacole.

29 JUIN 1993

O.R.S.T.O.M. Fonds Documentaire

N° : 41599

Cote : B

## 1 - LE FONCTIONNEMENT ECOLOGIQUE DES MILIEUX COTIERS : deux voies complémentaires.

Nous savons depuis longtemps que toute problématique d'aménagement en aquaculture exige une bonne connaissance du fonctionnement écologique du milieu naturel récepteur. Ce fonctionnement écologique peut être abordé par l'intermédiaire de deux grands types de raisonnement, qui font appel à des descripteurs et des échelles de temps et d'espace fort différents mais cependant complémentaires.

- Il s'agit tout d'abord de l'étude des paramètres intégrateurs à long terme de fonctionnement du milieu, c'est à dire la structure sédimentologique avec la double composante biogéochimique et biodétritique, et l'organisation socio-écologique des peuplements benthiques. L'ensemble de ces observations s'interfèrent pour donner une image résiduelle du fonctionnement du milieu sur un pas de temps très long, voire interannuel, et conduisent à la définition de cette récente notion, très séduisante, du "confinement" des milieux littoraux par rapport au domaine marin (O.GUELORGET, J.P. PERTHUISOT, 1983).

- Il s'agit d'autre part, de l'étude directe des caractéristiques du milieu environnant : l'eau, ce que l'on peut appeler globalement l'hydroclimat de l'écosystème aquatique. L'étude de l'hydroclimat d'un milieu côtier peut, là encore, être abordé de deux façon, à partir d'études de type hydrologique ou bien de type hydrodynamique, ce qui est très différent. Ces études physiques, envisagées encore de manière trop confuse ou partielle dans l'écologie des milieux paraliques, permettent d'aborder le fonctionnement de ces écosystèmes à des échelles de temps beaucoup plus fines, saisonnières, journalières ou horaires, ce qui n'est pas sans poser le problème trop classique de la représentativité de ces études vis à vis de cellules des paramètres intégrateurs précédents. Cependant, l'observation, la simulation, voire même prévisionnelle, des mécanismes de l'écoulement des masses d'eau d'origines diverses rencontrées dans les milieux côtier n'en demeurent pas moins indispensables, du point de vue scientifique (explication causale du "confinement" paralique) et du point de vue de la gestion aquacole de ces milieux.

## 2 - HYDROLOGIE ET HYDRODYNAMIQUE : un rappel terminologique.

- Une approche hydrologique consiste essentiellement en l'étude des échanges hydriques entre les différents compartiments du cycle de l'eau, sur des pas de temps long. L'hydrologie fait appel à des sciences voisines telles que la climatologie, la pédologie, la géomorphologie; étudie des fonctions de production et de transfert empiriques et s'appuie sur des raisonnements stochastiques afin d'élaborer des modèles de simulation conceptuels globaux.

- Une approche hydrodynamique consiste en l'étude de la circulation des masses d'eau à l'intérieur de chacun des compartiments hydrologiques, ainsi qu'en la dispersion des matières organiques ou minérales qui y sont associées, en suspension ou en solution. L'hydrodynamique fait appel à des sciences telles que l'hydraulique et la mécanique des fluides; suit une approche physique des phénomènes en s'appuyant sur de nombreux traitements d'analyse numérique pour résoudre les équations fondamentales de l'écoulement des fluides; élabore des modèles de circulation et de dispersion à discrétisations spatiale (maillage) et temporelle (pas de temps) fines.

3 - 1'HYDROCLIMAT DU DOMAINE PARALIQUE : une articulation de concepts complémentaires.

Lorsqu'on aborde le fonctionnement physique d'un milieu littoral on doit immédiatement choisir une échelle de temps.

- A une échelle saisonnière, le fonctionnement est abordé à travers l'équilibre entre deux types de bilans : le bilan hydrique à partir des apports continentaux (Q), et des régimes de précipitation (P) et d'évaporation (E), ce qui est dominant en milieu lagunaire, et le bilan des échanges marins, ce qui est dominant en milieu estuarien. En lagune, le terme (P-E) peut dominer et le régime est climato-dépendant, c'est le cas des lagunes méditerranéennes; par contre, si le terme (Q-E) domine, le régime est hydro-dépendant, c'est le cas des lagunes tropicales. Ce genre d'étude conduit à parler en terme de "saison lagunaire".

- A une échelle de temps plus fine, (journalière, horaire), le fonctionnement est abordé à travers l'interaction des deux paramètres moteurs de la circulation des eaux paraliques, le vent et la marée. L'écoulement des masses d'eau lagunaires ou estuariennes sont alors simulées par une modélisation hydrodynamique.

4- UNE PREMIERE APPROCHE : l'hydroclimatologie du domaine paralique.

Cette approche préliminaire se conçoit dans un esprit de description analytique des phénomènes observés et conduit à définir de simples correspondances analogiques.

- Les descripteurs envisagés sont de quatre types :

- . hydrologiques : débit des apports continentaux
- . climatiques : régimes des précipitations, de l'évaporation et du vent.
- . Limnimétriques : variations des hauteurs du plan d'eau (le marnage journalier, saisonnier ou interannuel)

. Physicochimiques, parmi lesquels on distingue les paramètres conservatifs lors de la circulation des eaux tels que la salinité, et les paramètres indicateurs d'une hétérogénéité locale et/ou temporaire, tels que la température, la tension en oxygène dissous, le pH ou la turbidité.

- les résultats, obtenus principalement sous forme de bilans hydriques et salins, permettent :

. de situer un ordre de grandeur des paramètres sensibles du fonctionnement d'un milieu côtier. (influence marine, crues, vent, marnage etc...)

. d'établir le régime de variabilité temporelle de ces paramètres.

. d'établir le cas échéant une zonation spatiale représentative du milieu, qui peut être déterminante dans le choix d'un site propice à l'aquaculture.

- Un exemple représentatif : l'étude hydroclimatologique du système lagunaire du lac Togo (Afrique de l'Ouest).

Un exemple assez typique de cette approche hydrologique globale peut être donnée par l'étude du système lagunaire du lac Togo (Togo) menée par l'ORSTOM de 1981 à 1984 (B. MILLET, 1983-1984). Les Figures 1 et 2 présentent respectivement la morphologie du complexe lagunaire avec l'ensemble des installations déployées au cours de l'étude, et la zonation du plan d'eau lagunaire effectuée à l'issue de la première année de mesure. Les figures 3a et 3b reproduisent les variations spatio-temporelles de la salinité des eaux sur l'ensemble du système en continu au cours des trois années d'étude. Ces diagrammes synthétiques permettent de suivre à tout moment la configuration saline des eaux lagunaires et de caractériser les évolutions sur une longue période de temps, pour chacune des "zones" lagunaires choisies. Si l'on considère la salinité des eaux (exprimée ici en terme de "salinité pratique" et en terme de conductivité en  $\mu\text{S}$  à  $25^\circ\text{C}$ ) comme un descripteur conservatif du déplacement des masses d'eau, on peut tirer de cette représentation les quelques remarques suivantes :

- Le balancement saisonnier des masses d'eau lagunaires est mis en évidence. En effet la remontée progressive vers le fond de la lagune (zone 1) des eaux salées d'étiage, d'origine marine, génératrice d'un fort gradient longitudinal de salinité entre novembre et juin, et qui s'oppose au lessivage brutal des eaux continentales de crue qui homogénéisent très rapidement le milieu de juillet à octobre.

- La vitesse d'évolution des gradients peut être déduite graphiquement et le temps de réponse du milieu aux conditions hydroclimatique locales peut ainsi être quantifié.

- La variabilité interannuelle du système apparaît. Par exemple, la réponse de la lagune à une ouverture prolongée sur la mer se traduit par des salinités plus élevées au cours de l'étiage 1981, tandis qu'un important déficit pluviométrique est capable d'inverser le

gradient de salinité habituel de crue en 1983.

L'apport allochtone des eaux marines au cours de l'étiage, qui peut avoir des conséquences importantes dans le déconfinement du milieu, peut être confirmé par l'étude des termes du bilan hydrique de la lagune, qui ont pu être raisonnablement quantifiés grâce à la faible superficie du milieu. Les figures 4 et 5 présentent respectivement les variations temporelles des termes du bilan hydrique et l'évolution interannuelle du volume mensuel écoulé à l'exutoire de la lagune. Les apports marins d'étiage peuvent alors être quantifiés en volume.

De plus, le suivi de certains paramètres physico-chimiques (température, oxygène dissous) sur des cycles journaliers et saisonniers, l'observation de la stratification verticale du milieu, très temporaire et localisée, ainsi que la reconstitution sur vingt quatre ans du marnage annuel exceptionnellement élevé pour une lagune (2 à 3 m), ont contribué à préciser les grandes caractéristiques du fonctionnement du système lagunaire togolais et d'écarter immédiatement pour l'aquaculture, certains sites hydrologiquement trop instables ou certaines techniques (en enclos par exemple) incompatibles avec le marnage du plan d'eau.

On voit que ce type d'étude, infiniment modulable en fonction de la nature et du régime du milieu paralique considéré, permet tout de même assez facilement, à condition d'avoir le temps ou de bénéficier de longues chroniques de mesures, de connaître globalement le fonctionnement physique général d'un système, de mettre en évidence les quelques descripteurs sensibles ainsi que leur variabilité et de quantifier, dans le meilleur des cas, les flux aux entrées et sorties du système.

Dans une optique d'aménagement aquacole les études hydroclimatiques classiques permettent d'évaluer les caractéristiques homéostatiques d'un milieu et de se prononcer d'ores et déjà sur le choix de sites potentiels et de technologies propices.

Cependant, une étude écologique en domaine paralique ne pourrait se limiter à cette première phase analytique du raisonnement qui ne formalise des concepts qu'en terme de correspondance analogique, conduisant à élaborer une série d'hypothèses quant à la causalité du fonctionnement observé du système. La compréhension objective de ce fonctionnement, puis son explication en terme de corrélation, puis sa prévision, exigent désormais de pouvoir reproduire les principaux phénomènes observés dans des modèles de simulation hydrologiques ou hydrodynamiques qui nécessitent d'être tout d'abord calés et ensuite validés sur de longues séries de mesures. (de quelques mois pour un modèle hydrodynamique jusqu'à plusieurs années pour certains modèles hydrologiques).

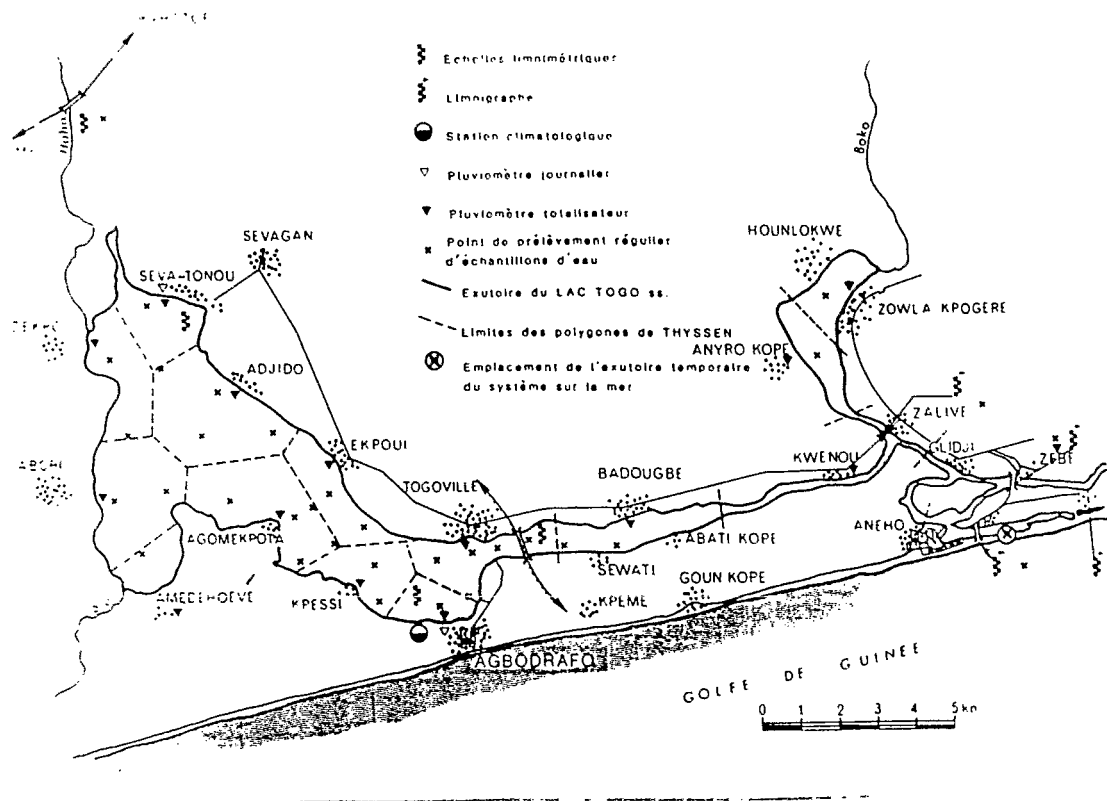


Fig. 1. Etude du système lagunaire du Lac Togo . Carte de situation générale et des installations hydroclimatologiques. (d'après B. MILLET, 1983).

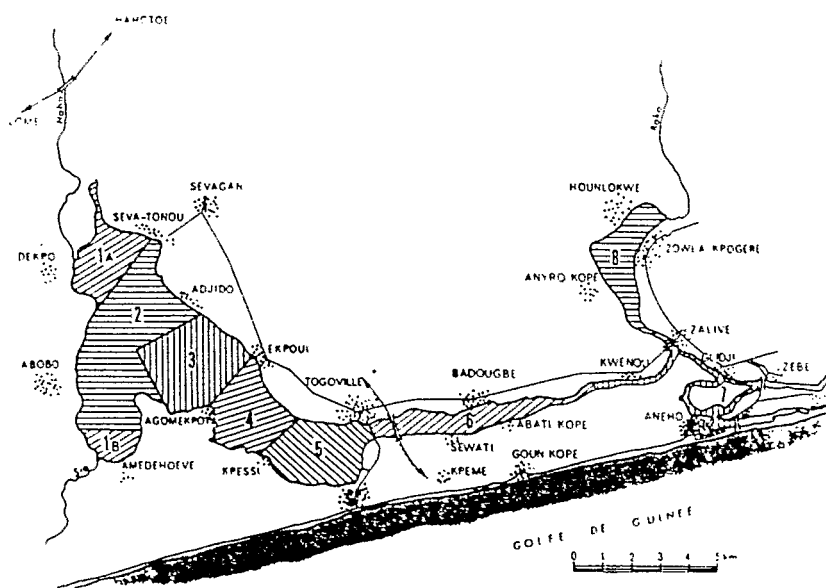


Fig. 2 . Carte de la zonation hydrologique du Lac Togo (d'après B. MILLET, 1983).

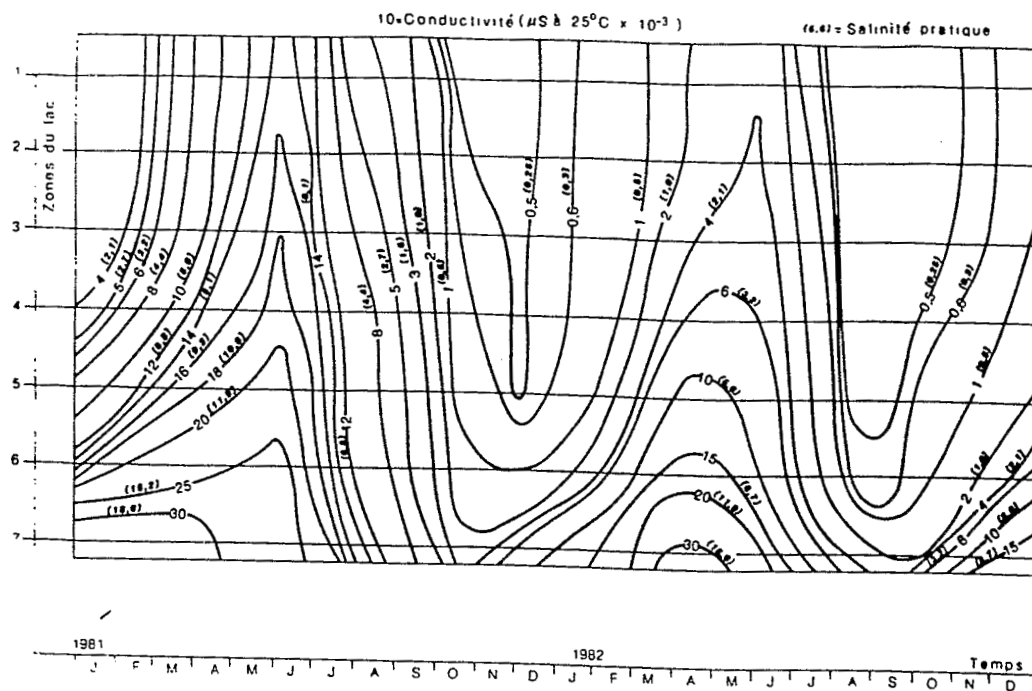


Fig.3 - a.

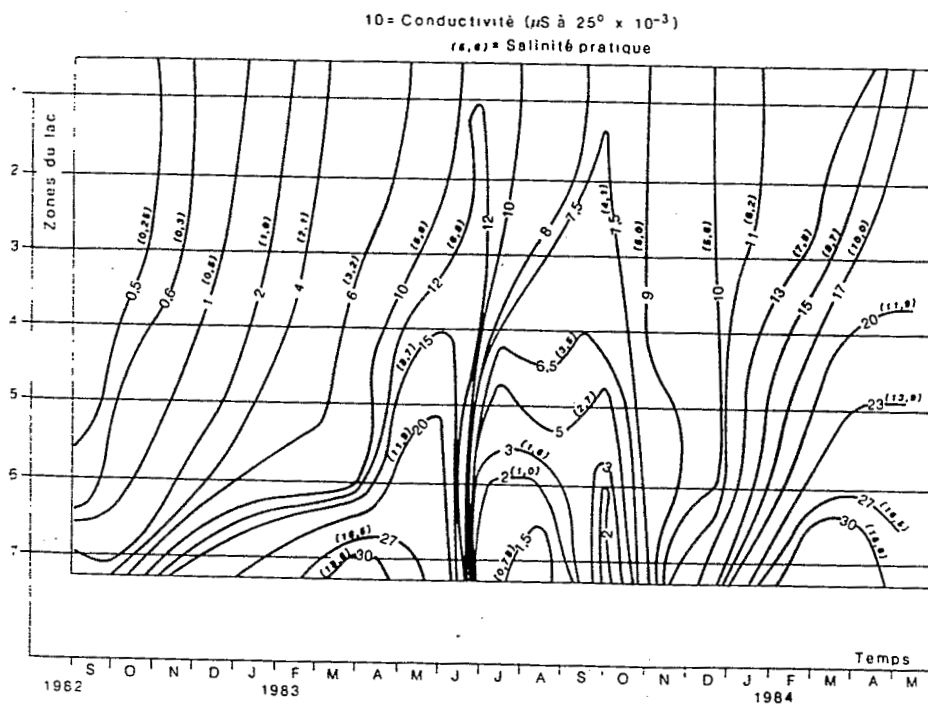


Fig. 3 - b. Diagrammes spatio-temporels de la salinité des eaux du Lac Togo. (d'après B. MILLET, 1983-1984).

Fig.4. Variations des termes du bilan hydrologique du Lac Togo.  
(d'après B. MILLET, 1983).

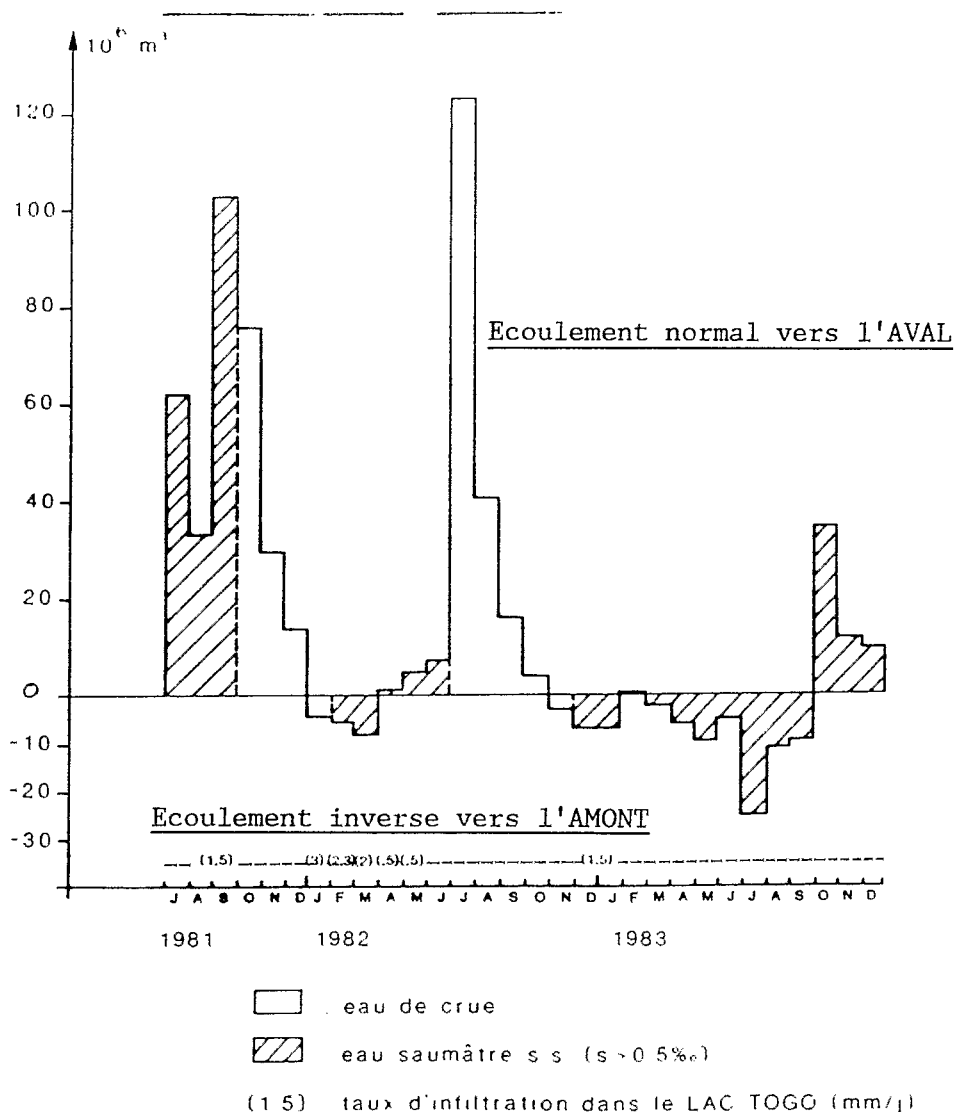
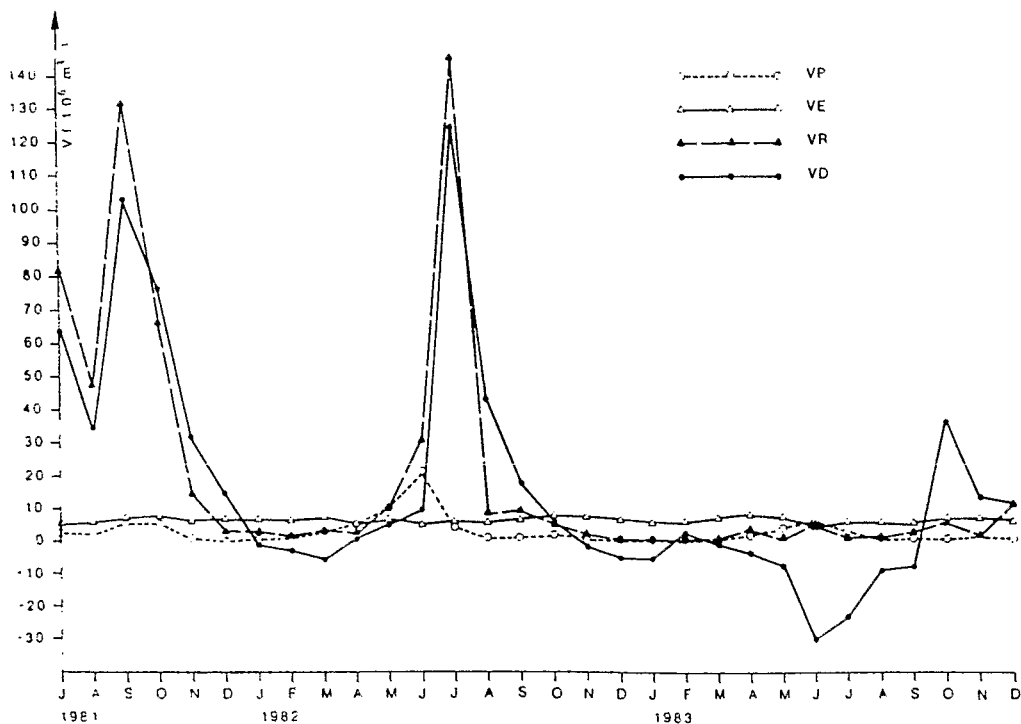


Fig.5. Variations saisonnières des écoulements à l'exutoire du Lac Togo, au niveau de la section de Togoville. (d'après B. MILLET, 1984).



5 - LA DEUXIEME APPROCHE : la prémodélisation du domaine paralique.

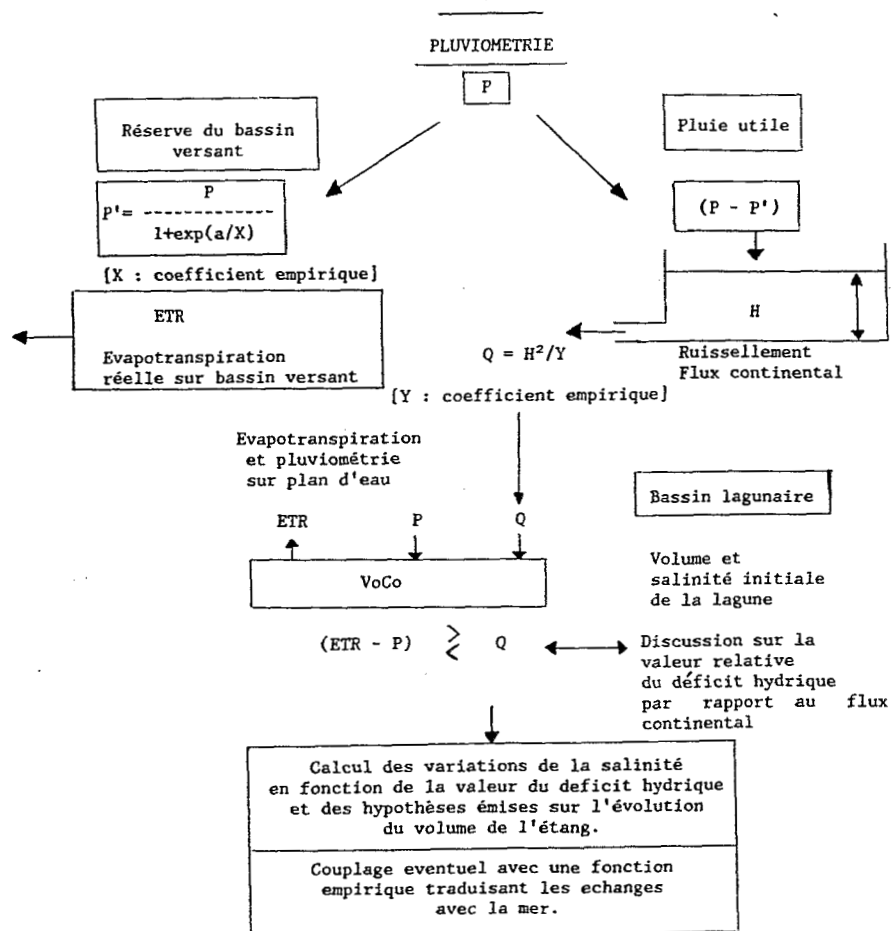
Cette seconde étape qui est une étape intermédiaire, consiste à élaborer un modèle conceptuel et global du fonctionnement hydrologique d'une lagune ou d'un estuaire pris dans son ensemble et considérée alors comme une "boîte noire". Ce type de modélisation qui demeure assez classique, repose sur une représentation schématique du milieu en compartiments qui peuvent atteindre plusieurs dizaines, voire centaines de kilomètres carrés en surface. On traite les transferts entre compartiments par l'intermédiaire de fonctions empiriques.

Ces modèles, encore inspirés d'une conception hydrologique, permettent de faire le raisonnement à un stade causal, en comprenant mieux le fonctionnement de l'hydroclimat d'un système littoral à partir de simulation à échelle de temps moyennes (journalières, mensuelles).

La figure 6 présente très schématiquement un exemple d'une modélisation globale des variations de la salinité d'une lagune, sous le contrôle des apports de crue continentale Q, des apports précipités P et de la contrainte d'évapotranspiration réelle ETR. Cet exemple illustre le type de schématisation utilisé pour compartimenter tout le domaine hydrologique, ainsi que le type d'équations paramétriques dont le calage doit faire l'objet de procédures d'optimisation.

Fig. 6

EXEMPLE D'UN MODELE ULTRA SIMPLIFIE  
CONCEPTUEL ET GLOBAL D'UNE LAGUNE  
SOUmise A DES INFLUENCES MARINES ET CONTINENTALES.



La figure 7 présente un exemple d'une discrétisation spatiale compartimentée utilisée par HUTCHISON (1976) dans une modélisation globale des variations des hauteurs d'eau et des volumes propagés dans l'estuaire du lac St Lucia en Afrique du Sud. On remarquera, le traitement global des termes hydrologiques de forçage (précipitation - évaporation - apport), et les deux façons de traiter les échanges entre les compartiments à partir d'une équation de continuité (conservation de la masse) et de la formule empirique d'écoulement de Manning - Strickler. Les compartiments sont d'une dizaine de kilomètres de côté. On voit que ce type de prémodélisation est avant tout conceptuelle, c'est à dire que la simulation se limite à articuler entre eux des compartiments et des fonctions de transfert dont le découpage, la formulation et la signification ont été pré-établis à partir d'une analyse préalable des phénomènes. Le modèle consiste par conséquent à tester les hypothèses émises le plus souvent à l'issue de la première phase d'étude, précédemment décrite, et nécessite plusieurs années de chroniques hydrologique pour son calage, puis sa validation. La compréhension des mécanismes hydrologiques internes d'un milieu paralique, sa dynamique propre, doit nécessairement faire l'objet d'une modélisation hydrodynamique fine de la circulation des eaux et de la dispersion de ses constituants.

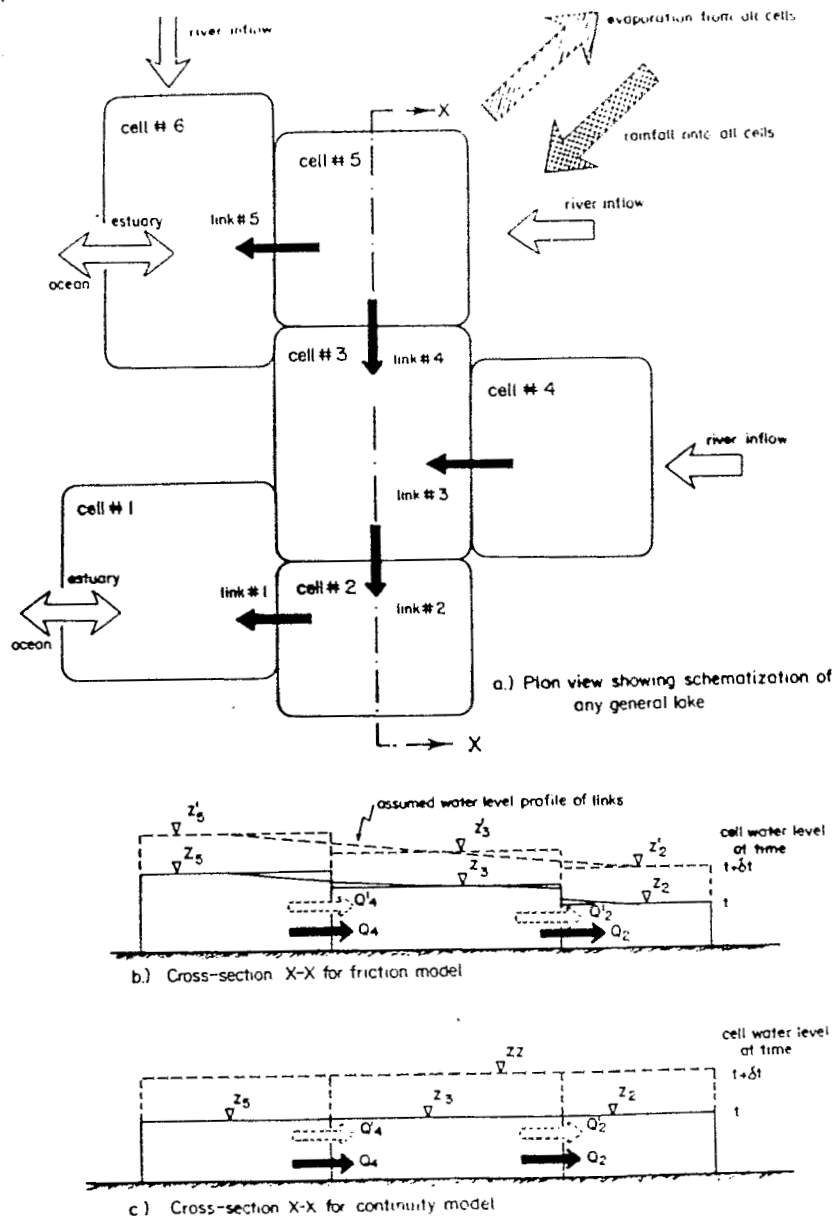


Fig.7. Exemple de discrétisation spatiale d'un modèle global d'estuaire, (Lac Santa Lucia, Afrique du Sud, d'après HUTCHISON, 1976).

6 - LA TROISIEME APPROCHE : la modélisation hydrodynamique du domaine parallèle

Ce dernier type d'étude, de loin le plus élaboré, diffère radicalement des précédents en ce sens que l'on cherchera désormais à simuler la circulation des masses d'eau et de leurs constituants à partir du traitement des mécanismes physiques qui en sont à l'origine et en utilisant une discrétisation très fine de l'espace (maillage de quelques centaine de mètres de côté) et des pas de temps de l'ordre de quelques minutes. La démarche est toujours la suivante :

- formulation mathématique des équations fondamentales de l'écoulement des fluides (équation de Navier-Stokes).

- Elaboration d'une série d'hypothèses simplificatrices permettant de réduire le nombre et la complexité de ces équations.

- Choix d'un schéma numérique adapté, permettant la résolution des équations différentielles.

- Choix d'une discrétisation spatiale et temporelle adaptée au milieu et respectant la stabilité du schéma numérique.

La formulation mathématique consiste à écrire les trois équations principales de la conservation de la quantité de mouvement, la conservation de la masse et la conservation d'une substance dissoute, auxquelles viennent s'ajouter le cas échéant l'équation de la conservation de l'énergie et l'équation d'état. Ces équations sont le plus souvent simplifiées de façon à les rendre bidimensionnelles intégrées sur la largeur ou sur la profondeur ou bien mono dimensionnelles dans le cas de chenaux étroits. Les équations différentielles sont ensuite approximées par un schéma numérique aux différences finies ou aux éléments finis dont la consistance et surtout la stabilité doivent faire l'objet de nombreux tests. Les aspects délicats de ces modèles sont principalement :

- une connaissance très précise de la topographie du milieu.

- le traitement représentatif des conditions aux limites du domaine.

- le besoin de série de mesures de calage de hauteurs et de vitesse, sur le milieu et aux principales limites débitantes, effectuées de façon tout à fait synchrone, sur des périodes qui supportent toutefois d'être plus courtes que dans le cas des approches précédentes.

Ces modèles qui s'inspirent de la logique de base des mécanismes hydrodynamiques, sont les seuls qui autorisent toute simulation de type prévisionnel, après aménagement aquacole par exemple. Cependant, les contraintes de résolution de ces modèles font qu'ils nécessitent un support informatique important et qu'ils ne sont pas adaptés, contrairement aux modèles hydrologiques précédents, à de longues périodes de simulation. Ce sont éminemment des "outils" de simulation explicative et prévisionnelle du fonctionnement, sur de courtes périodes représentatives.

Les "sorties" de ces modèles sont présentées sous forme de cartographie à très court terme du champ des vitesses moyennes du courant ou de sa structure verticale, ainsi que de la dispersion de la salinité des eaux. Des traitements numériques ultérieurs permettent

d'accéder aux champs des vitesses résiduelles, essentielles à toute interprétation écologique à partir du déplacement réel des masses d'eau. Les figures 8 et 9 présentent respectivement deux exemples d'un champ de vitesses instantanées à un instant  $t$ , et d'un champ de courants résiduels de Lagrange sur un cycle de marée, en Baie de Seine, d'après la modélisation de J.C. Salomon (1985).

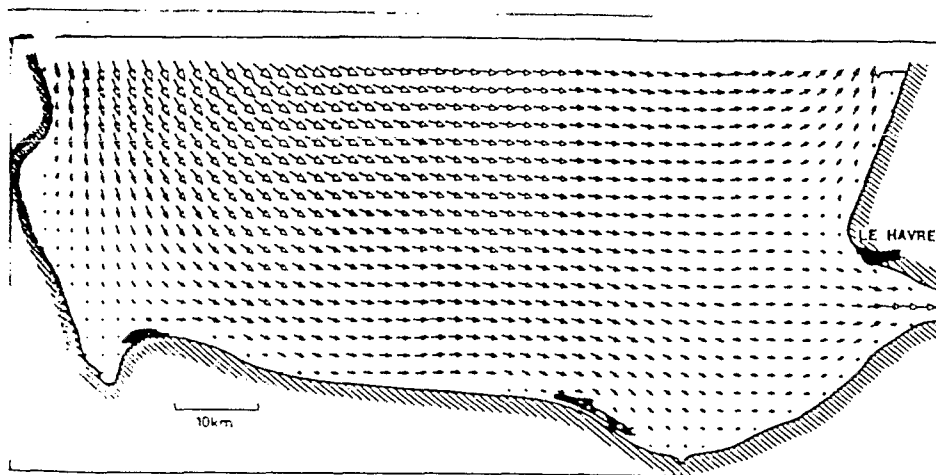


Fig.8. Champ des vitesses instantanées à la sortie d'un modèle bidimensionnel de circulation en Baie de Seine (d'après J.C. SALOMON, 1985).

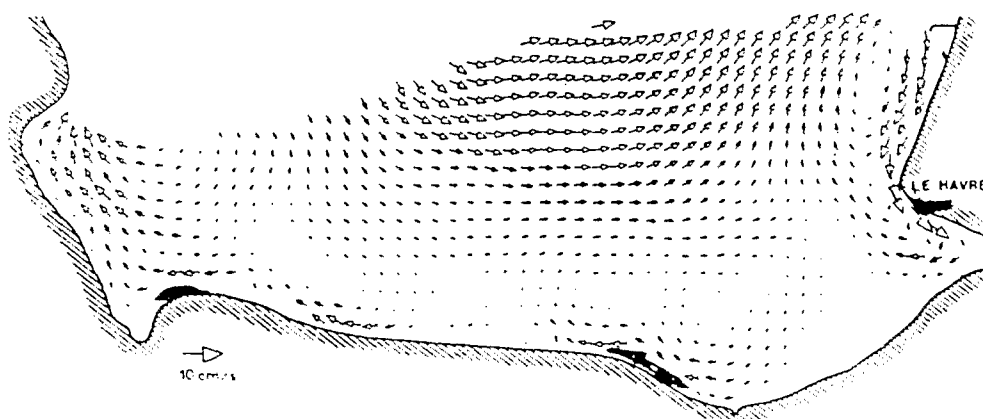
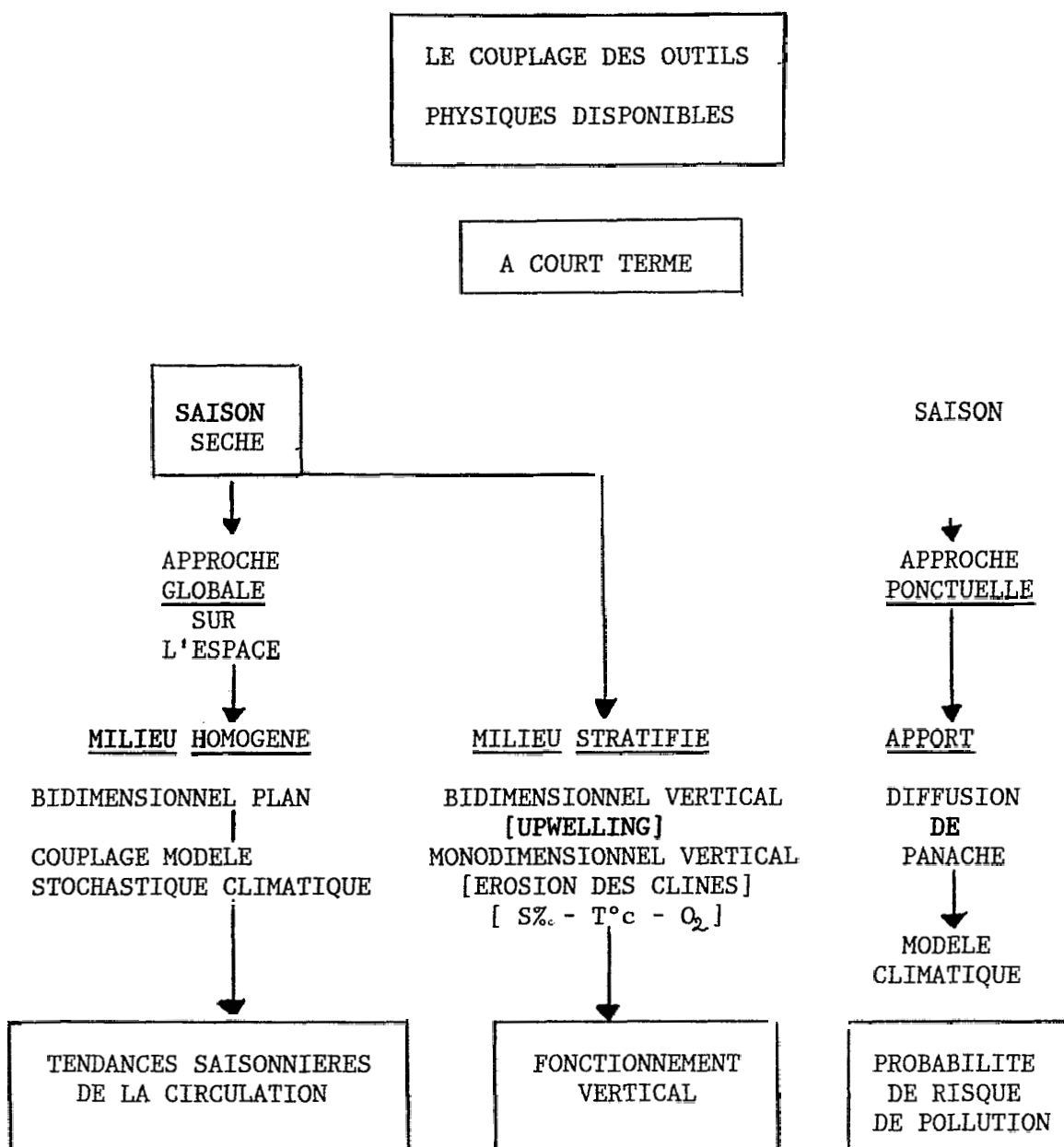


Fig.9. Exemple d'un champ de vitesses résiduelles lagrangiennes, à la sortie d'un modèle bidimensionnel de circulation en Baie de Seine . (d'après J.C. SALOMON, 1985).

7 - L'OBJECTIF FINAL : le couplage des outils physiques disponibles.

Il s'agit désormais de hiérarchiser toutes les notions qui viennent d'être présentées isolément. On retrouve immédiatement cette notion d'échelle de temps dans laquelle il faut d'emblée se situer. Le diagramme suivant se propose de schématiser les différentes méthodologies de travail que permet l'utilisation de différents modèles hydrodynamiques applicables dans le cas d'une lagune méditerranéenne soumise à un balancement saisonnier de masse d'eau. on remarquera surtout qu'un seul modèle ne répond jamais à l'ensemble des questions mais qu'au contraire, à une problématique bien précise, doit correspondre une articulation bien précise de différents modèles.



RESULTATS :

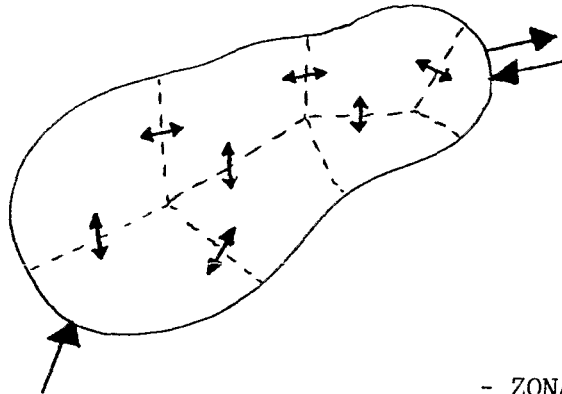
- CHAMP DE VITESSE
- TENSION DE FOND
- TRAJECTOIRES
- VITESSES RESIDUELLES

- EVOLUTION CLINES
- VITESSES VERTICALES

- ZONES SENSIBLES

A LONG TERME

ANALYSE ECOLOGIQUE SYSTEMIQUE



RETOUR A UNE  
MODELISATION DE  
"TYPE HYDROLOGIQUE"

- ZONATION DE L'ESPACE
- DETERMINATION DES FONCTIONS DE TRANSFERTS INTER-COMPARTIMENT

MODELE  
HYDRODYNAMIQUE

- Coefficient d'échange
- Flux
- Vitesses Résiduelles

MODELE  
SYSTEMATIQUE  
A COMPARTIMENT

- Renouvellement des Eaux
- Masse Dissoute

MODELE  
BIOLOGIQUE

8 - CONCLUSION

De ce rapide aperçu des méthodes d'approche du fonctionnement physique des milieux paraliques, trois remarques s'imposent :

- la complémentarité de l'approche purement hydrologique et de l'approche par simulation hydrodynamique.

- le caractère extrêmement spécialisé d'un modèle hydrodynamique qui n'a de valeur que sur le milieu sur lequel il a été rigoureusement adapté et calé, et qui ne peut donner de résultats que dans le cadre strict de la problématique pour laquelle il a été conçu.

- enfin, la réflexion, plus que jamais actuelle, au sujet de l'utilisation de ces modèles de simulation physique, à leur interface, qui doit être optimale, avec les modèles de simulation biologique.

En effet, dans le but d'accéder progressivement à des simulations de plus en plus globales du fonctionnement d'un milieu paralique, avant et après aménagement, ce qui est indispensable à toute recherche de planification écologique de ces milieux productifs, il reste à intensifier la réflexion concernant le couplage des descripteurs physiques (champ de vitesse, turbulence, contrainte de fond,...) et biologiques, ainsi que les relations de causalité qui en découleront.

Il semble que cette réflexion entérinée d'écologie appliquée à la production aquacole des milieux côtiers intervienne fort à propos dans l'état actuel du développement des projets d'aménagement. En effet, au-delà des problèmes purement technologiques, zootechniques ou socio-économiques, apparaissent de plus en plus l'importance du fonctionnement propre du milieu ainsi que l'effet de retour des exploitations sur ce fonctionnement à plus ou moins long terme. Un effort de recherche fondamentale pluridisciplinaire doit désormais être consenti, par des équipes formées d'hydrologues, d'écologues, de benthologues et de productivistes, accédant chacun à une vision la plus complète qu'il soit des caractéristiques du fonctionnement des milieux côtiers concernés. Plusieurs remarques sont d'actualité :

- de façon pragmatique, l'orientation scientifique actuelle en matière de recherche environnementale appliquée à la mise en valeur des milieux côtiers peut être pressentie dans deux voies principales :

\* l'utilisation de simulations hydrodynamiques sur des milieux côtiers dont la structure biologique naturelle est connue pour expliquer et rendre prédictive la théorie du "confinement", afin d'élaborer une méthodologie d'évaluation écologique de faisabilité et d'impact d'aménagement aquacole.

\*Le développement complémentaire "in vitro" sur des élevages existants, afin de caler des fonctions de production adaptées et de coupler ultérieurement les simulations du fonctionnement hydrodynamique du milieu et du fonctionnement de compartiments aquacoles.

C'est dans cette orientation scientifique qu'une équipe de recherche du département C "Ecosystèmes Aquatiques" de l'ORSTOM travaille actuellement, à partir de la modélisation hydrodynamique de trois milieux paraliques très originaux : la lagune de Thau en France (programme expérimental pilote ECOTHAU), l'estuaire de la Casamance au Sénégal et le lagon de Nouméa en Nouvelle Calédonie.

Une étroite collaboration est ainsi souhaitée avec l'équipe IFREMER de M. HERAL à la Tremblade (modèle de production conchylicole), avec l'équipe portugaise de M. Ramiro NEVES de l'université de Lisbonne (hydrodynamique littorale), avec les théoriciens du "confinement", J.P. PERTHUISOT et O. GUELORGET, et avec l'équipe italienne du Pr. E. FRESI de la Station d'Ecologie Littorale d'Ischia, pour progresser dans la compréhension quantitative de l'environnement paralique.