

UNIVERSITE DE PARIS VII

D.E.A. DE BIOMATHEMATIQUES

APPLICATION D'UN MODELE D'ECOSYSTEME PELAGIQUE
AU CALCUL DES CONSEQUENCES ECOLOGIQUES
DU FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE ELECTRIQUE
"ENERGIE THERMIQUE DES MERS" A TAHITI.

ETUDIANTE : FRANCE COUSIN

RESPONSABLES : Mrs ALAIN MENESGUEN et YVES MONBET
Centre Oceanographique de Bretagne
IFREMER - Brest

Rapport de stage présenté en Octobre 1986.

RESUME

A partir d'un premier modèle simple simulant le milieu tropical oligotrophe, un second modèle permet de prévoir les conséquences d'un rejet d'eau riche en sels nutritifs dans les eaux côtières environnant le site d'installation d'une centrale "E.T.M ".

Le premier modèle simule l'évolution temporelle du cycle de l'azote sur une colonne d'eau représentée sous forme d'un système de boîtes tandis que le second est une représentation tri-dimensionnelle du site ETM reprenant le même procédé.

24077

8004

F 350

COU
A

IFREMER
 Centre de BREST
 S.D.P.
 B.P. 337
 29273 BREST CEDEX
 Tél. : 98.45.80.55
 Télex 940 627

DIRECTION ENVIRONNEMENT
 ET RECHERCHES OCEANIQUES

DEPARTEMENT ENVIRONNEMENT LITTORAL

AUTEUR(S) :		CODE :
COUSIN France		N° DERO-86-34-EL
TITRE APPLICATION D'UN MODELE D'ECOSYSTEME PELAGIQUE AU CALCUL DES CONSÉQUENCES ECOLOGIQUES DU FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE "ENERGIE THERMIQUE DES MERS" A TAHITI		Date : Décembre 86
		Tirage nb : 5
Nb pages : 69		
Nb figures : 30		
Nb photos : 0		
CONTRAT (intitulé)		DIFFUSION
N° _____		Libre <input type="checkbox"/>
		Restreinte <input checked="" type="checkbox"/>
		Confidentielle <input type="checkbox"/>
<u>RESUME</u>	<p>Un premier modèle permet de simuler la structure verticale de l'écosystème pélagique tropical en conditions non-perturbées: il simule en particulier le pic de chlorophylle observé vers 80-100m de profondeur et l'augmentation de la teneur en nitrates, sous la couche euphotique</p> <p>Un second modèle tente de simuler, par un système de boîtes communicantes, le panache de rejet d'eau tiède rejetée à -50 m par la centrale. Le modèle prévoit une stimulation nette de la production primaire</p>	
ABSTRACT		
Mots-clés :	Modèle écologique - Phytoplancton tropical - Energie Thermique des Mers	
Key words :		



Ifremer Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer

30466

IFREMER - SDP
 Centre de BREST
 Bibliothèque
 B.P. 337 - 29273 BREST CEDEX

PLAN DU RAPPORT

- INTRODUCTION
- I . PRESENTATION DE E.T.M. ET DU SITE DE TAHITI

- A . QU'EST CE QU'E.T.M.?

- 1) Principe
 - 2) Historique
 - 3) E.T.M. Pour quoi faire ?

- B . LE SITE D'INSTALLATION

- 1) Généralités
 - 2) Le lagon
 - 3) Les abords extérieurs du site

- II . MODELISATION DU MILIEU NATUREL

- INTRODUCTION

- A . DESCRIPTION DU MODELE

- 1) Représentation du système
 - variables internes
 - variables forçantes
 - 2) évolution temporelle
 - le système d'équations
 - le jeu de paramètres
 - 3) Représentation spatiale :
 - Le modèle en boîtes
 - la diffusion turbulente
 - la sédimentation
 - 4) La simulation : description du logiciel

- 4
- B . RESULTATS OBTENUS
 - C . ANALYSE DE SENSIBILITE
 - D . CONCLUSIONS

III - MODELISATION DU REJET D'EAU FROIDE ET DE SON IMPACT

- A - DESCRIPTION DU PANACHE
- B - LE MODELE EN BOITES
- C - RESULTATS

CONCLUSION

INTRODUCTION

Dans le cadre de l'implantation d'une centrale "Energie Thermique des Mers" à Tahiti, une étude d'impact a été entreprise afin de prédire les conséquences écologiques d'une telle installation sur le lagon et la frange océanique qui entourent le site. En particulier, le rejet dans ce milieu naturellement pauvre d'une eau riche en sels nutritifs peut susciter un développement phytoplanctonique non négligeable.

Les tentatives de prédiction de l'effet d'un enrichissement sur un écosystème déjà réalisées concernent essentiellement les zones d'upwellings (Walsh, 1971 - Wroblewski, 1977...) et les estuaires (Thomann, 1974...). Par ailleurs, quelques auteurs ont modélisé le milieu pacifique oligotrophe (Jamart, 1977, 1979 - Vinogradov, 1973).

La présente étude aborde à la fois ces deux thèmes : à partir d'un modèle simple reproduisant l'écosystème planctonique tropical, elle tente de prévoir l'ampleur de l'enrichissement provoqué par un upwelling artificiel.

I PRESENTATION DE L'E.T.M. ET DU SITE DE TAHITI

A - QU'EST-CE- QU' L'E.T.M. ?

1) PRINCIPE (Marchand, 1979)

En tant que machine thermique , une centrale E.T.M. utilise la différence de température entre une source chaude et une source froide. La première est fournie par les eaux superficielles tropicales (20-25°C) ou équatoriales (28-30°C). La deuxième est tirée de l'eau profonde d'origine antarctique (4°C) que l'on trouve à ces LATITUDES vers 1000 m de profondeur.

Dans un système en cycle ouvert, l'eau chaude pompée en surface passe dans un évaporateur à pression très faible (0,03 atm) où elle entre en ébullition. La vapeur entraîne alors une turbine qui produit de l'électricité. En sortie de turbine, la vapeur se refroidit soit par mélange, soit par contact avec l'eau froide qui alimente un condenseur, et ressort à une température d'environ 20°C. Dans le cas d'un cycle dit fermé, l'eau chaude transmet ses calories à un liquide intermédiaire, l'ammoniaque le plus souvent, au travers d'un échangeur. La vapeur d'ammoniaque entraîne la turbine et se refroidit au contact de la paroi froide du condenseur. Le liquide est récupéré et repart dans un nouveau cycle. Les figures 1 et 2 illustrent le fonctionnement de ces 2 cycles (O.T.E.C., 1982).

Le cycle fermé exige de grandes surfaces d'échanges de chaleur entre l'eau et l'ammoniaque (1 ha pour 1 MWe). Les évaporateurs doivent rester rigoureusement propres pour maintenir un fort coefficient d'échange. Il faut combattre le développement de bio-salissures, donc prévoir une procédure d'antifouling.

Le cycle ouvert doit veiller à maintenir le vide dans la centrale grâce à des désaérateurs absorbant les gaz dissous - oxygène et dioxyde de carbone - susceptibles d'être libérés lors de l'évaporation de l'eau de mer. Il demande une turbine de très grand diamètre, mais a l'avantage de pouvoir fabriquer de l'eau

douce lors de la condensation de la vapeur d'eau.

Dans les 2 cas, la centrale est totalement autonome, utilisant à peine 1/3 de l'énergie produite au fonctionnement des pompes d'eau. Mais contrairement aux autres centrales thermiques qui utilisent de grandes différences de température (100°C ou plus), la centrale E.T.M. doit compenser une amplitude faible ($T=20^{\circ}\text{C}$) par de grands débits d'eau. A titre d'exemple, la production de 100 MWe (1/10^e de la puissance produite par une centrale nucléaire) exigerait 400 m³/s d'eau pour chacune des 2 sources chaude et froide (la valeur du débit moyen de la Seine). La production jusqu'à maintenant ne dépasse pas 100 KW (centrale japonaise).

Ce type de centrales impose plusieurs contraintes:

- l'utilisation de gros tuyaux (diamètre de 2 à 15m) pour véhiculer de grands débits d'eau.

- l'emploi de tuyaux résistant à de fortes contraintes mécaniques, en particulier le tuyau d'eau froide (1 Km de long ou davantage) qui doit pouvoir résister aux courants, à la houle, et à l'action corrosive de l'eau.

L'histoire de l'E.T.M. montre que le principal obstacle réside dans cette cheminée géante qui pose de gros problèmes d'installation et de maintenance.

2)HISTORIQUE

L'idée d'exploiter la différence entre des eaux de températures différentes pour produire de l'énergie fut lancée par le physicien D'Arsonval en 1881. Mais ce fut grâce à Georges Claude que ce principe fut expérimenté en eau douce puis en mer.

Le premier essai eut lieu en 1928 en utilisant l'eau chaude rejetée par un haut-fourneau à Ougrée et l'eau froide de la Meuse. La production fut de 60 KW pour un $T=20^{\circ}\text{C}$., et permit de valider les hypothèses de G. Claude. Dans les années 30, une centrale à terre à Cuba et une centrale flottante au large du Brésil fonctionnent jusqu'à ce que la conduite d'eau froide cède sous l'action des houles et de la tempête. Un dernier

projet de G. Claude en 1956 est reconnu économiquement viable mais avorte au profit d'autres sources d'énergie (hydroélectricité, usine marémotrice de la Rance, pétrole, nucléaire).

Face à la crise de l'énergie, l'E.T.M. suscite aujourd'hui un regain d'intérêt auprès de plusieurs pays (Massart, 1983). Les E.U s'attachent surtout à développer de grosses centrales en cycle fermé. En 1979, MINI-OTEC (Ocean Thermal Energy Conversion) a produit 10 KW. La France a un projet similaire en cycle ouvert sur le littoral de Tahiti. Des pays tels que la Hollande, la Suède, les Philippines, l'Inde, et surtout le Japon se tournent également vers ce type d'énergie "nouvelle".

Tous recherchent les matériaux assurant le meilleur rendement et une technique de construction et de pose du tuyau d'eau froide qui résiste aux contraintes de l'océan.

Le projet français consiste en une centrale de 5 MW en cycle ouvert. Un tuyau d'environ 3Km pompe l'eau profonde à 1000m. Le rejet peut se faire en eaux mélangées ($T^{\circ}=20^{\circ}\text{C}$) ou séparées ($T^{\circ}=10^{\circ}\text{C}$), le débit de sortie étant de 25 m³/s.

3) E.T.M. - POUR QUOI FAIRE ?

Georges Claude voulait utiliser l'énergie pour produire de la glace et améliorer ainsi les conditions de vie des pays chauds. On s'oriente maintenant vers des intérêts plus industriels:

- Implantée à terre, une centrale peut alimenter un réseau local en électricité. Ainsi, Papeete à Tahiti pourrait subvenir à ses besoins.

- L'eau douce produite en cycle ouvert peut être diversement utilisée.

- Les eaux froides et riches en sels nutritifs peuvent servir au développement de phytoplancton utilisé en aquaculture.

- Les centrales flottantes sont surtout prévues pour la synthèse de produits "énergétivores" tels l'ammoniac, l'aluminium, ou des carburants de synthèse.

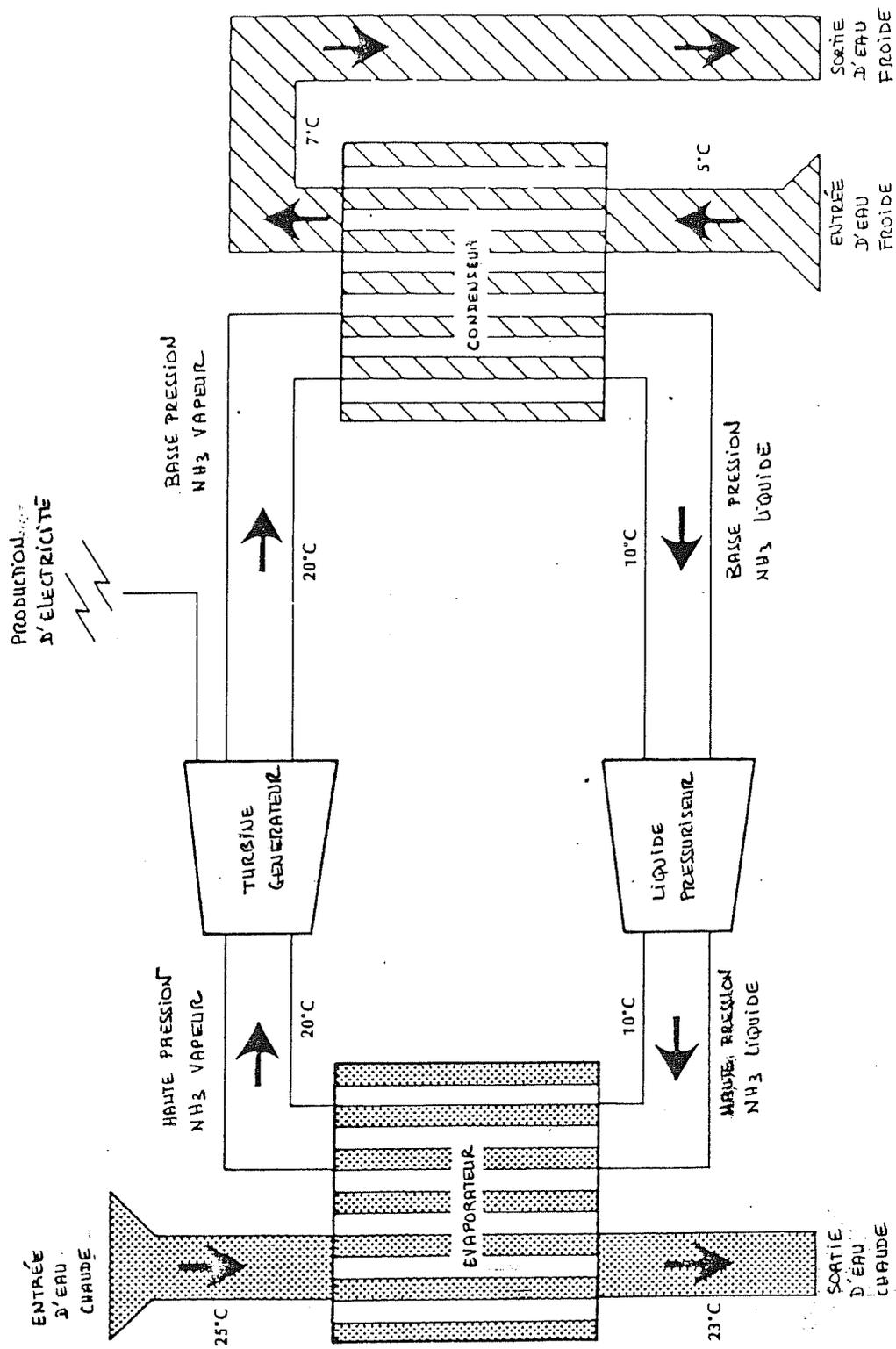


Figure 1. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE EN CYCLE FERME.

(IN OTEC , ENVIRONMENTAL EFFECTS ASSESSMENT PROGRAM PLAN ,)

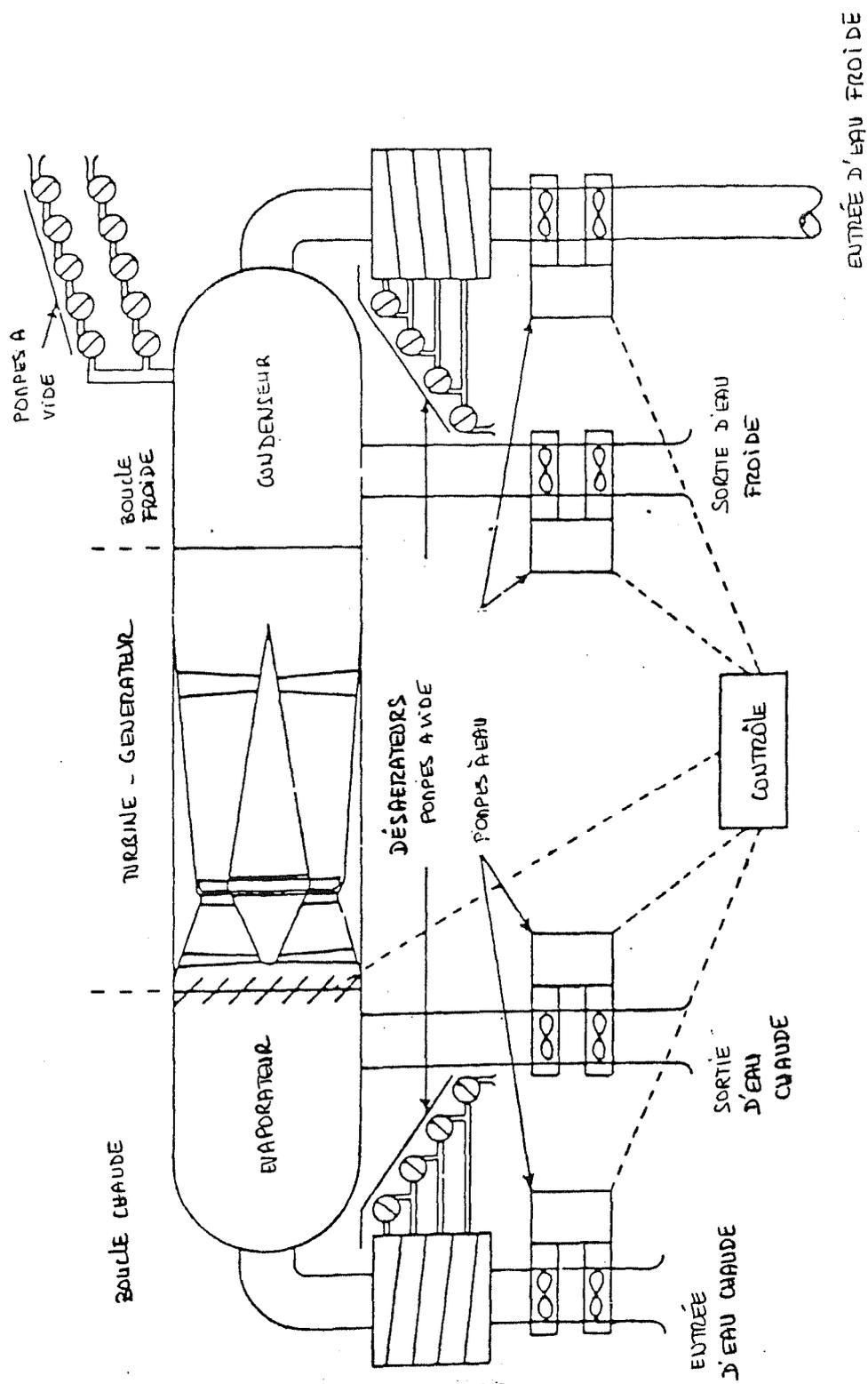


Figure 2. SCHEMA DE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE EN CYCLE OUVERT.

(in OTEC, ENVIRONMENTAL EFFECTS ASSESSMENT PROGRAM PLAN,)

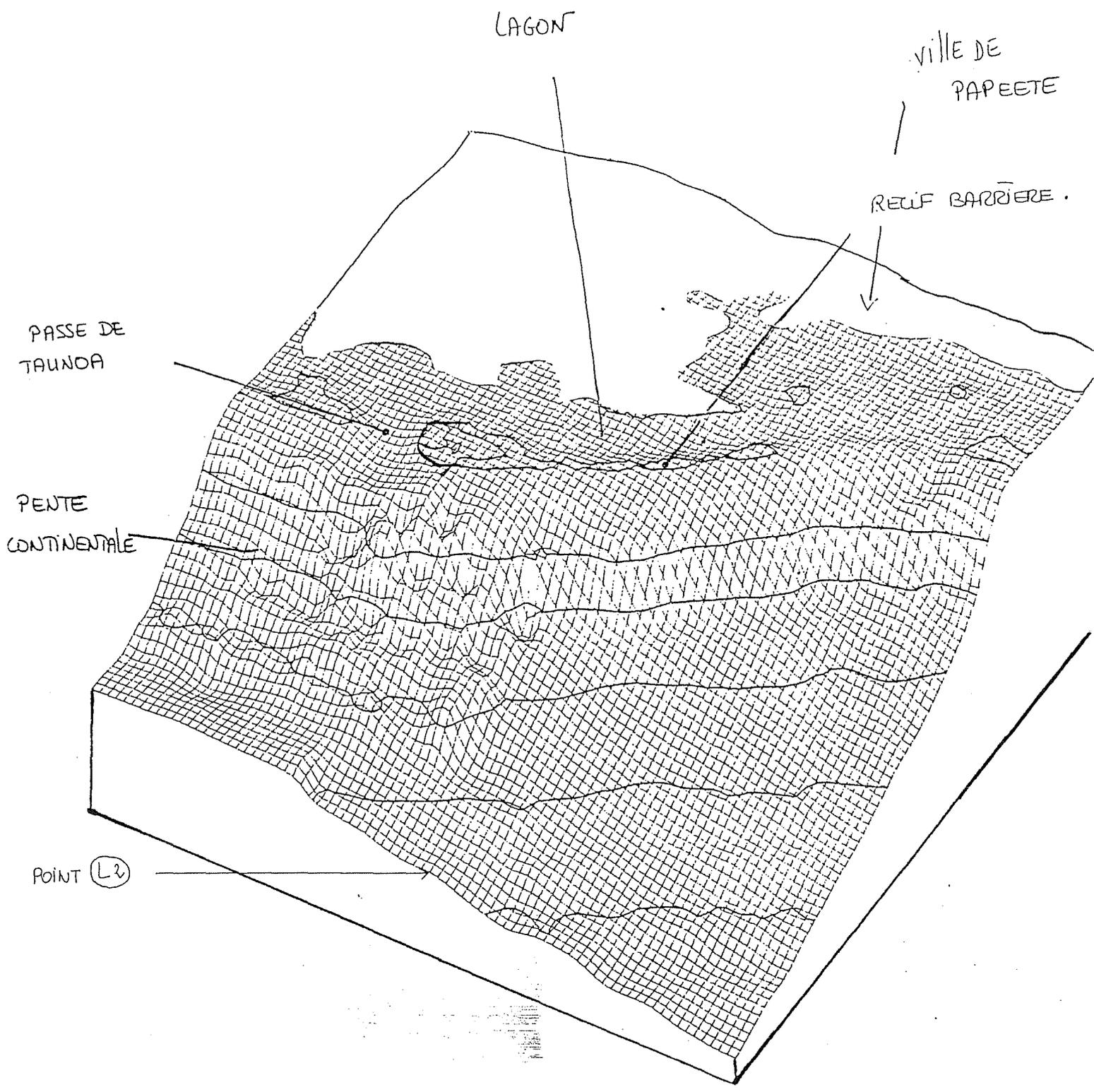


FIG 5 : PROFIL BATHYMETRIQUE DU SITE "ETH."

B . LE SITE D'INSTALLATION

1) CARACTERES GENERAUX

Le site choisi pour construire la centrale se trouve au Nord Ouest de l'île de Tahiti, à proximité de la ville Papeete. (Fig 3)

. La géomorphologie-

Les figures 4 et 5 illustrent la topographie du site : un lagon peu profond (20 m) mais étendu (2 Km * 20 Km). Le récif barrière est bien développé. Les récifs frangeants sont interrompus au débouché des rivières. Le fond est recouvert d'une couche de sédiments sablo-vaseux, d'origine détritique.

Du côté de l'océan, un plateau d'environ 500 m de longueur s'étend jusqu'à une profondeur de 100 m où apparaît une rupture de pente. Les fonds atteignent 1000 m à 3 Km de la côte.

. Climatologie -

La Polynésie est située au nord de la ceinture anticyclonique de hautes pressions, et soumise au régime des alizés de l'hémisphère sud qui soufflent généralement d'est-sud est. Elle présente deux saisons distinctes:

- La saison humide de Décembre à Mai correspond à l'été austral. A cette époque, la convergence entre les alizés de NE et de SE descend sur la Polynésie. Un couloir dépressionnaire dirigé vers l'Est se forme, à l'origine de précipitations fréquentes. Le temps est agité, avec grains violents et fortes pluies. L'air est chaud (25-26°C).

- La saison sèche de Juin à Novembre (hiver austral) est marquée par un renversement des vents. Le retour des alizés de SE amène un temps calme, de faibles précipitations et une forte insolation. Des cyclones parfois violents viennent perturber de façon temporaire le régime hydrobiologique des eaux océaniques et des lagons, présenté dans les pages qui suivent.

2) LE LAGON

La proximité de la zone urbaine, la construction d'une digue sur la barrière récifale, le dragage du chenal de Taunoa et la présence de deux rivières confèrent à ce lagon un hydrodynamisme et une écologie particuliers.

L'étude courantologique laisse apparaître une circulation générale d'Ouest en Est de vitesse faible ($< 0,5$ m/s) qui peut être contrariée en période calme (saison sèche) par une entrée d'eau en passe de Taunoa et une sortie vers Papeete par le port de Fare-Ute, en fonction des houles, marées et vents (Fig 6) (De Nardi et Al, 1983).

Température et salinité sont relativement stables ($T^{\circ}=28^{\circ}\text{C}$, $S=35,5-36 \text{ ‰}$), un léger gradient existant entre la baie du Taaone et le fond du lagon vers le port.

Pauvres en sels nutritifs, les eaux lagonaires montrent des fluctuations dues aux apports telluriques par les rivières du fond de la baie, qui se manifestent au niveau de la frange littorale. Au moment des fortes pluies, la charge en seston est particulièrement élevée ($10-11\text{mg/l}$) par rapport à celle mesurée dans les lagons voisins (Rougerie, 1984) et témoigne elle aussi de l'importance des rejets continentaux et de turbulences provoquant des remises en suspension du sédiment.

Par contre, les teneurs en Chlorophylle a ne sont pas singulières ($0,4-0,5$ microg/l), et les valeurs maximales sont observées dans le secteur le plus confiné du lagon. Si le nombre de cellules phytoplanctoniques est assez faible, les espèces sont nombreuses, les diatomées pennées et dinoflagellés prédominent. Certaines espèces d'eau douce et benthiques confirment l'influence continentale (Ricard, 1986).

La biomasse moyenne en zooplancton est de $49,8$ mg/m³, plus élevée en surface qu'en profondeur. Sa composition est représentative à la fois du milieu lagonaire et océanique .

La fig.7 résume les mesures de température, salinité et principaux composants.

Les mesures d'éléments polluants ont abouti à la conclusion suivante, qui résume assez bien l'individualité de ce lagon

ORIGINE des COURANTS
FACTEURS : MAREES

VITESSE EN CM/S

DEJARDI ET AL, 1983)

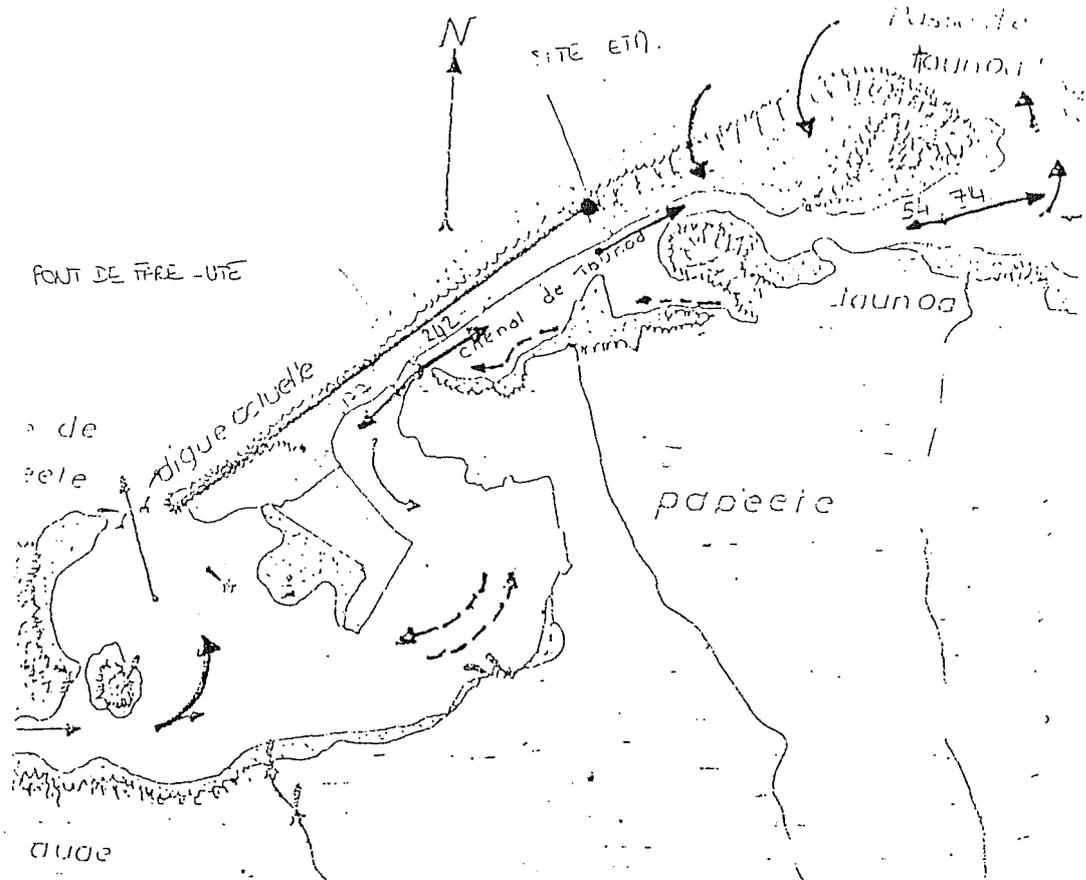


FIG. 6 :

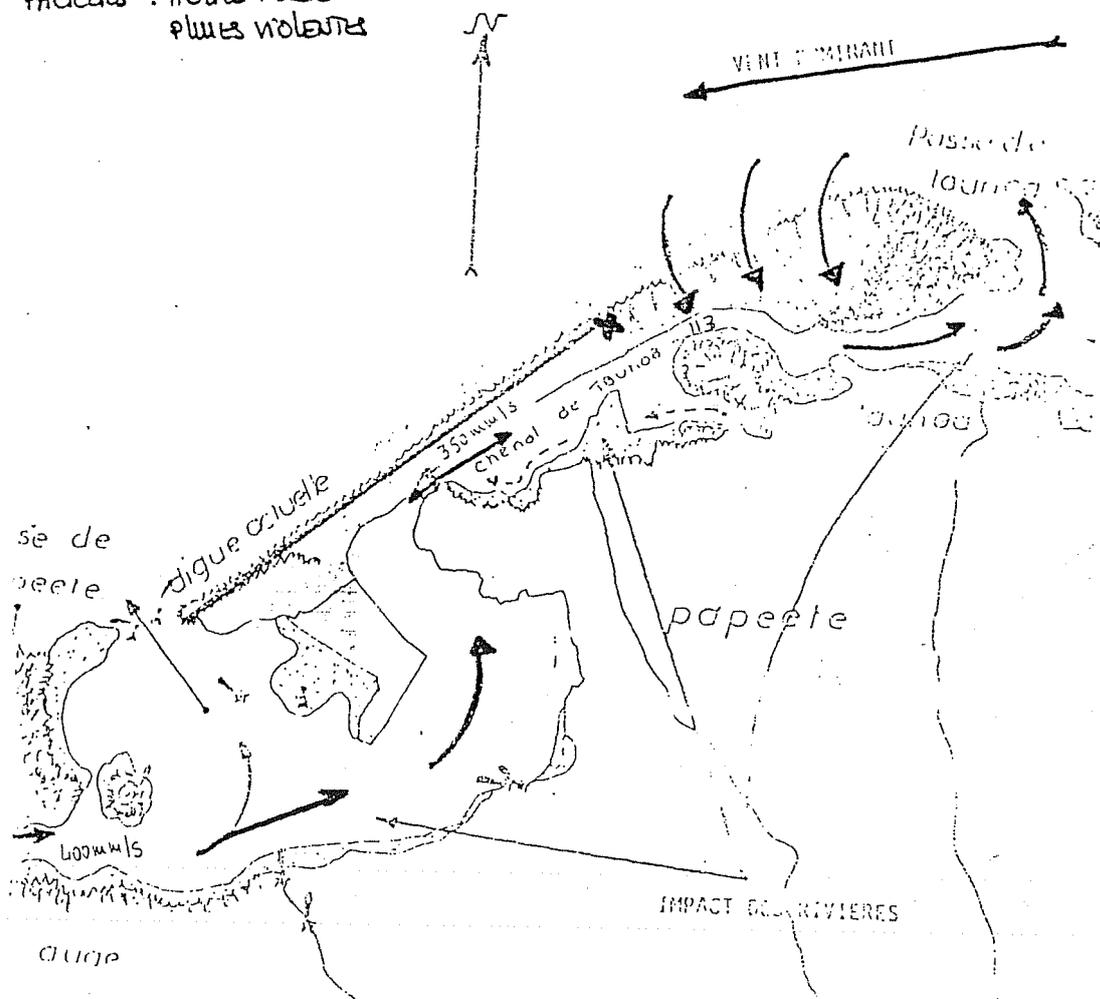
COURANTOLOGIE

DU

LAGON

SAISON DES PLUIES (DEC-JAN)

FACTEURS : HOULE FORTE
PLUMES VIOLENTES



TITRE

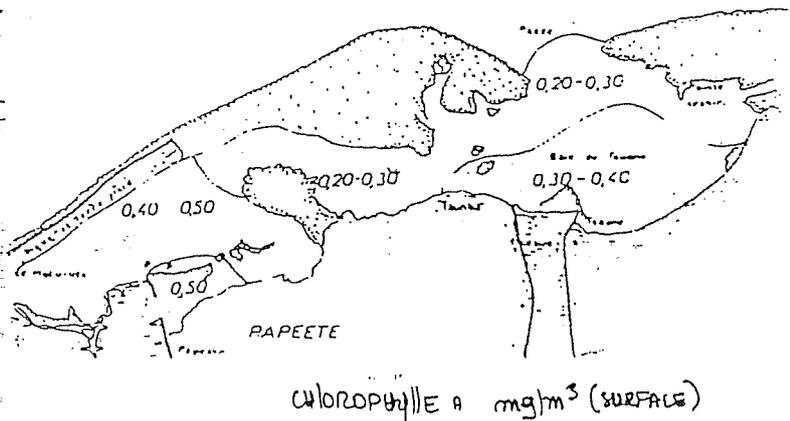
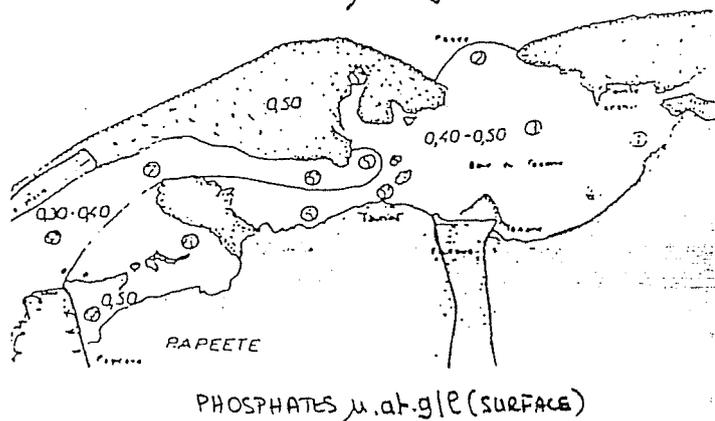
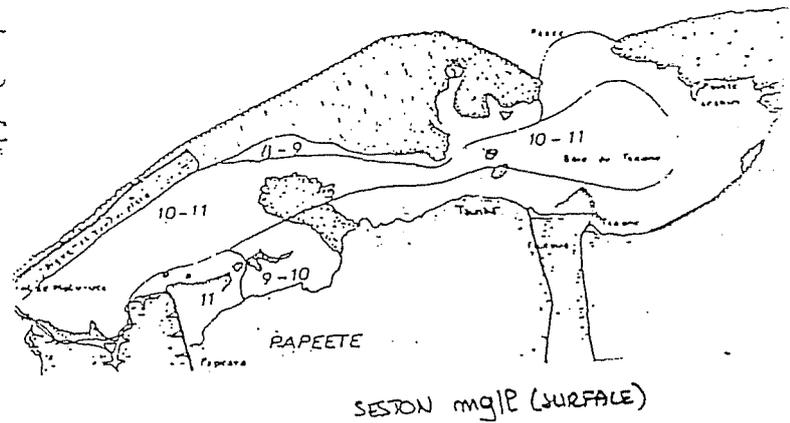
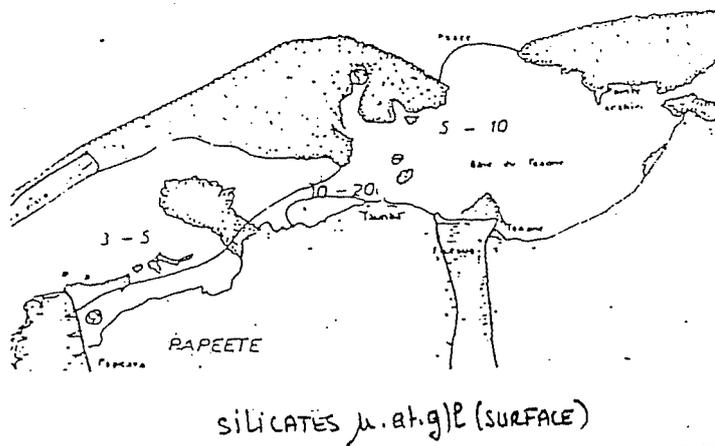
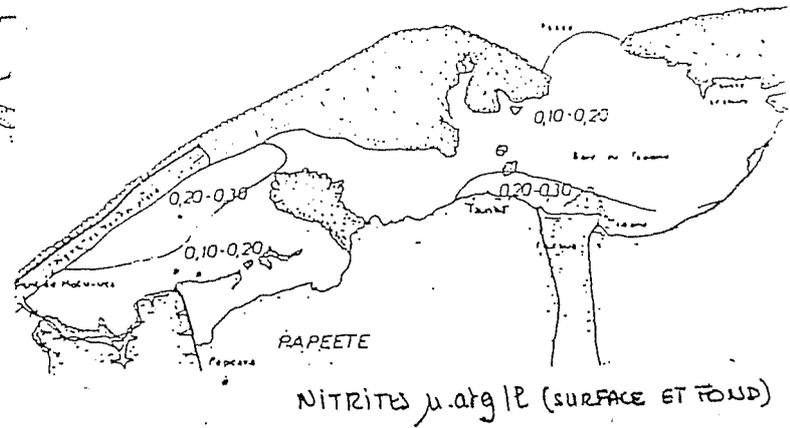
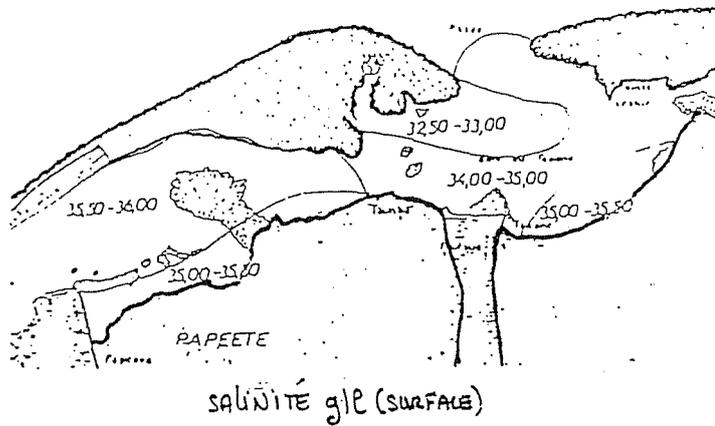
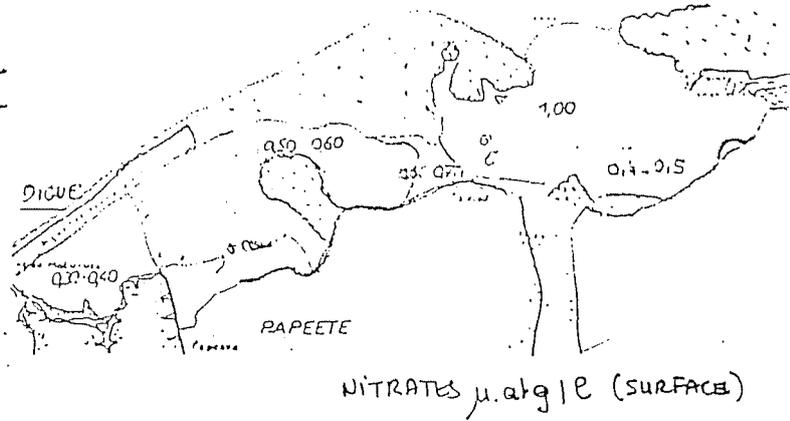
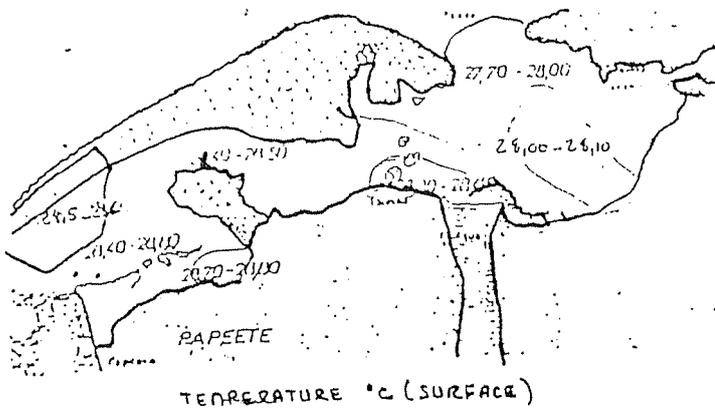


Fig. 7 - Sels nutritifs, seston et chlorophylle dans le lagon nord-ouest

(DENARDI ET AL, 1983)

(De Nardi et Al, 1983):

" La provenance et la circulation des eaux sont les deux paramètres qui régissent le fonctionnement de cet écosystème fortement dégradé."

3) LES ABORDS EXTERIEURS DU SITE

Les premières campagnes océanographiques avaient déjà mis en évidence la pauvreté des eaux tropicales océaniques ($< 1 \text{ mg Chl a/m}^3$) par rapport aux eaux tempérées (10 mg/m^3 dans la Manche, 40 mg/m^3 en zone d'upwelling). Un suivi d'une année (Nov 82-Oct 83) a permis de dégager le profil hydrobiologique des eaux face au site E.T.M. (Kessler et Monbet, 1984). D'autre part, des mesures le long de la barrière récifale indiquent l'effet de la décharge lagonaire, la teneur en Chl a étant similaire à celle du lagon (Charpy et Teuri, 1984).

Les propriétés physiques des eaux océaniques révèlent la présence de 4 masses d'eaux distinctes (Fig 8a). La circulation dans la zone qui nous intéresse est régie essentiellement par les contours de Tahiti imposant un courant alternatif de direction SW-NE, qui s'observe sur toute la colonne d'eau superficielle. Sa vitesse en surface varie de 20 à 40 cm/s ($< 10 \text{ cm/s}$ en profondeur). Le marnage de type semi diurne ne dépasse pas 40cm. La salinité de surface est directement dépendante des phénomènes d'évaporation et d'advection (peu d'apports d'eau douce) (Fig 8b). Elle fluctue entre 35,5 ‰ en été austral et 36 ‰ en hiver (S moyenne = 35,76 ‰) (Rougerie et Al, 1985). La période 82-83 a été marquée par une anomalie climatique (pas de renverse du courant équatorial sud) qui explique les fortes salinités de surface observées au début de l'année 83. La salinité diminue jusqu'à 500 m environ et se stabilise à 34,5 ‰ dans la couche inférieure. La température à l'interface océan-atmosphère ($T_{\text{moyen}} = 27,6^\circ\text{C}$ - $T_{\text{air-mer}} = 2^\circ\text{C}$) oscille avec une amplitude annuelle de 3°C entre les 2 saisons (Fig 9a) et concerne une mince couche de 50m en dessous de laquelle elle décroît régulièrement pour atteindre 4°C

FIG 8a : DIAGRAMME TEMPERATURE-SALINITE

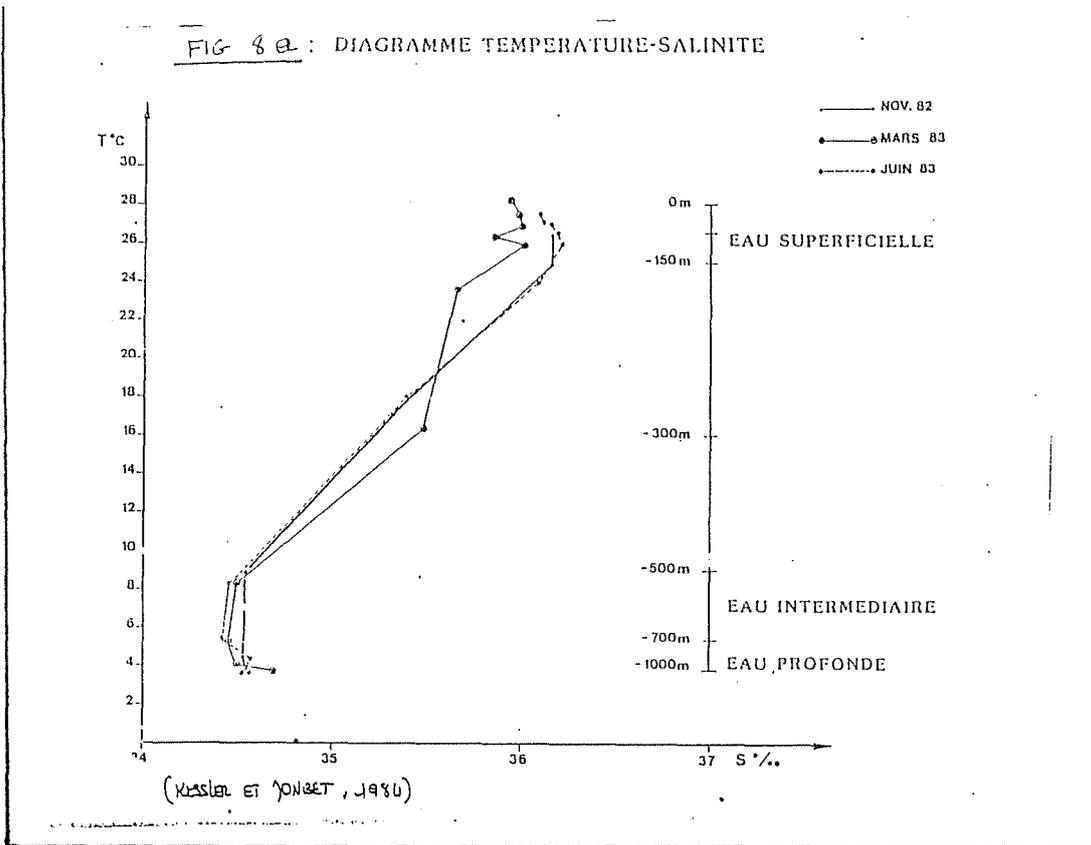


FIG 8a : DIAGRAMME T-S

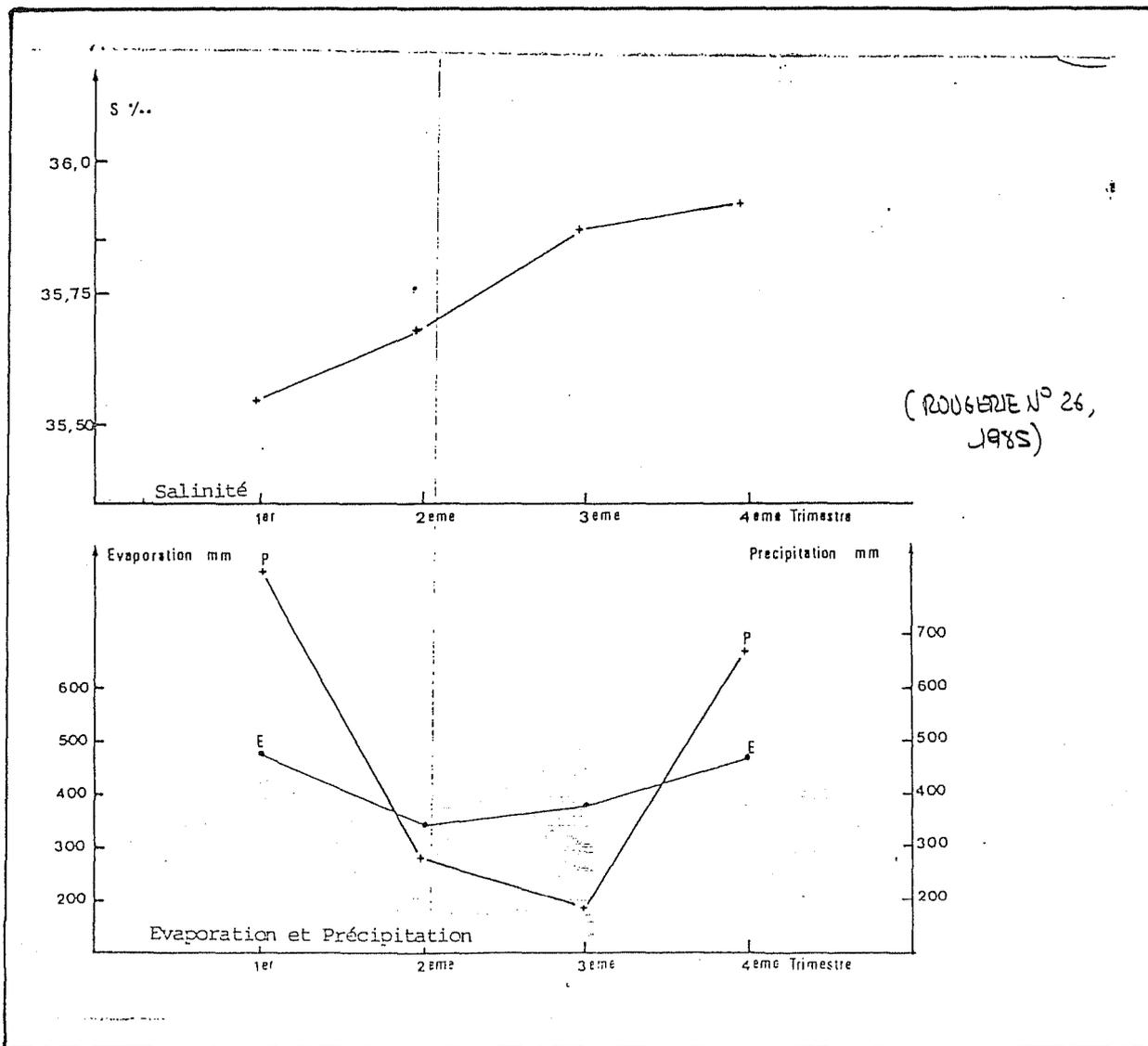
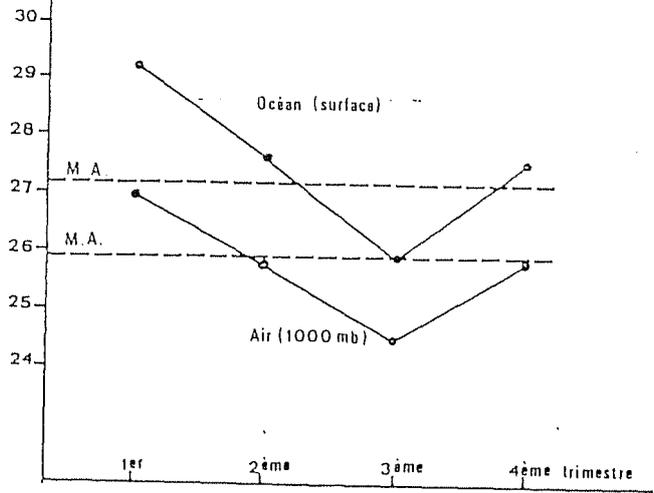


FIG. 8b : SALINITE DES EAUX FACE AU SITE "ETI"



(RESUME N°26,
(1985))

Fig.9a Température : Moyennes trimestrielles (été - hiver)
Période 1979-1985
Moyenne annuelle (M.A.) -----

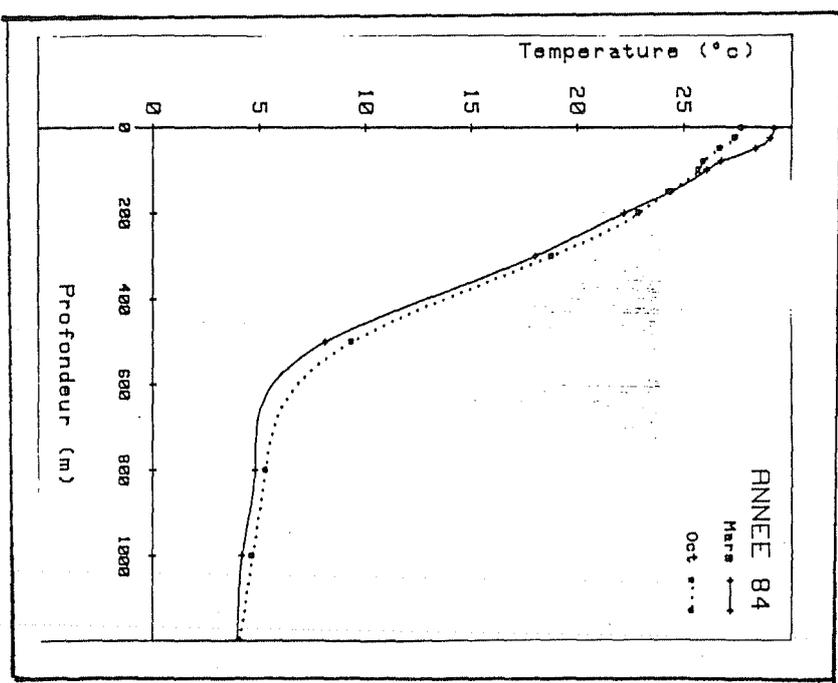
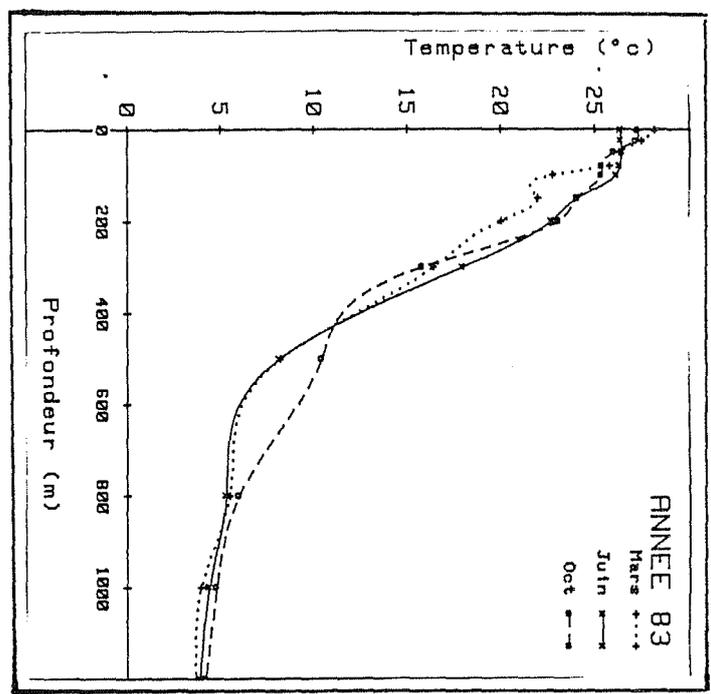
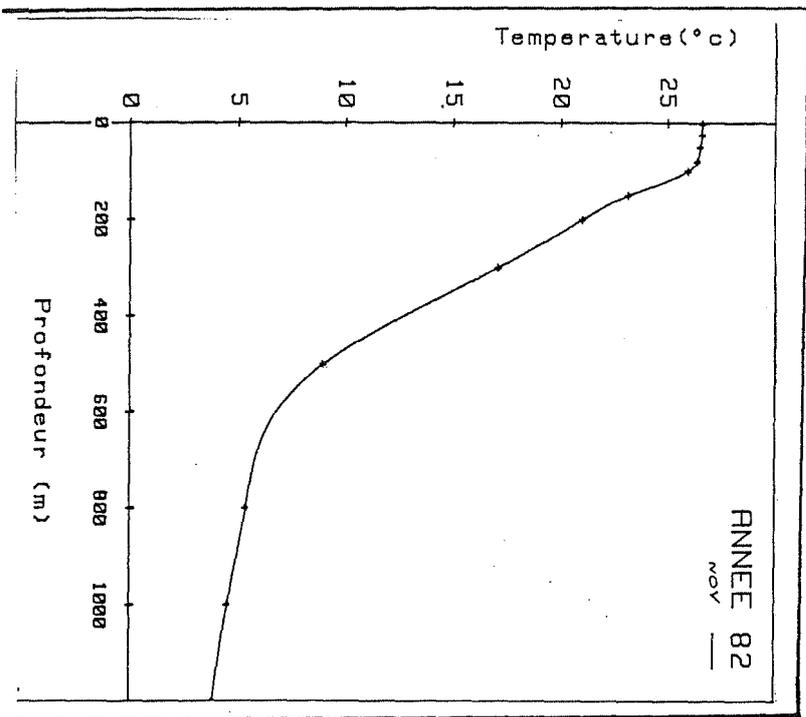


FIG 9b : VARIATIONS SAISONNIÈRES DU PROFIL DE TEMPÉRATURE, MESURÉS PENDANT 3 ANNÉES SUCCESSIVES -

à 1000 m . Les variations saisonnières et inter-annuelles sont faibles (Fig. 9b).

Le profil vertical des sels nutritifs sépare la colonne d'eau en 2 couches :une superficielle très appauvrie du fait de la consommation par le plancton, jusqu'à une profondeur de 300m où se trouve la région d'inflexion de nitrates, phosphates et silicates (Fig 10 a,b,c).

Les courbes de chlorophylle laissent apparaître un maximum sub-superficiel qui peut varier de 80 à 120 m, situé au niveau 6-7% de la lumière incidente. Cette importante variation verticale pourrait être en relation avec un phénomène d'ondes internes particulièrement intense dans cette zone. De par leurs concentrations ($\leq 0,75 \text{ mg/m}^3 \text{ chl a}$), ces eaux sont oligotrophes tout en étant plus riches que les eaux océaniques du large ($0,04-0,23 \text{ mg/m}^3$ dans le gyre central pacifique - Eppley et Al, 1973). Les profils observés varient sensiblement au cours du temps (fig 11). Une absence de corrélation entre les teneurs en sels nutritifs et les concentrations de chlorophylle révèle une instabilité du système, probablement entretenue par des ondes internes de période semi diurne (Monbet, comm. pers.). Un effet de masse insulaire contribuerait également à l'enrichissement en chlorophylle (Ricard et Delesalle, 1982). Le plancton est représenté essentiellement par de l'ultraplancton et un nombre important d'espèces (Ricard, 1986).

La profondeur du maximum de chlorophylle est en concordance avec les observations faites sur tout l'océan pacifique tropical, et sans rapport avec la température, la salinité ou la densité (Venrick et Al, 1973). Il existe diverses explications de ce maximum: l'absence de nourriture suffisante en surface entraînerait une diminution de la flottabilité des cellules telle que celles-ci sédimenteraient jusqu'à une profondeur proche de la nitracline où une alimentation suffisante leur permettrait d'ajuster de nouveau leur flottabilité (Steele et Yentsch, in Venrick et Al, 1973). D'autres auteurs (Eppley et Al, 1973) attribuent ce maximum à une augmentation de la teneur en Chl. a des cellules, en réponse à de faibles intensités lumineuses aux

niveaux où se trouvent les sels nutritifs. Mais tous s'accordent à considérer l'azote comme principal facteur limitant la croissance phytoplanctonique (Eppley et Al ,1979). Les faibles concentrations observées face au site E.T.M. en témoignent (Fig 8a). On n'observe apparemment pas de cycle saisonnier important. Ce phénomène serait la conséquence de modifications hydrologiques apportant des sels nutritifs en surface. Cette hypothèse est d'autant plus vraisemblable que la pycnocline est peu marquée, favorable à des mouvements verticaux induits en particulier par les vents (Bienfang et Szyper,1984).

CONCLUSION GENERALE

Les observations faites par différents organismes dessinent un environnement à la fois simple et complexe:

- le lagon de Taaone subit une influence terrestre du fait des apports telluriques, et il est fragilisé par la proximité de zones urbaines.
- la frange océanique au large du récif est fortement oligotrophe. Sa structure verticale est déstabilisée par des phénomènes physiques très variables au cours du temps.

VARIATIONS VERTICALES DES TENEURS EN PHOSPHATES

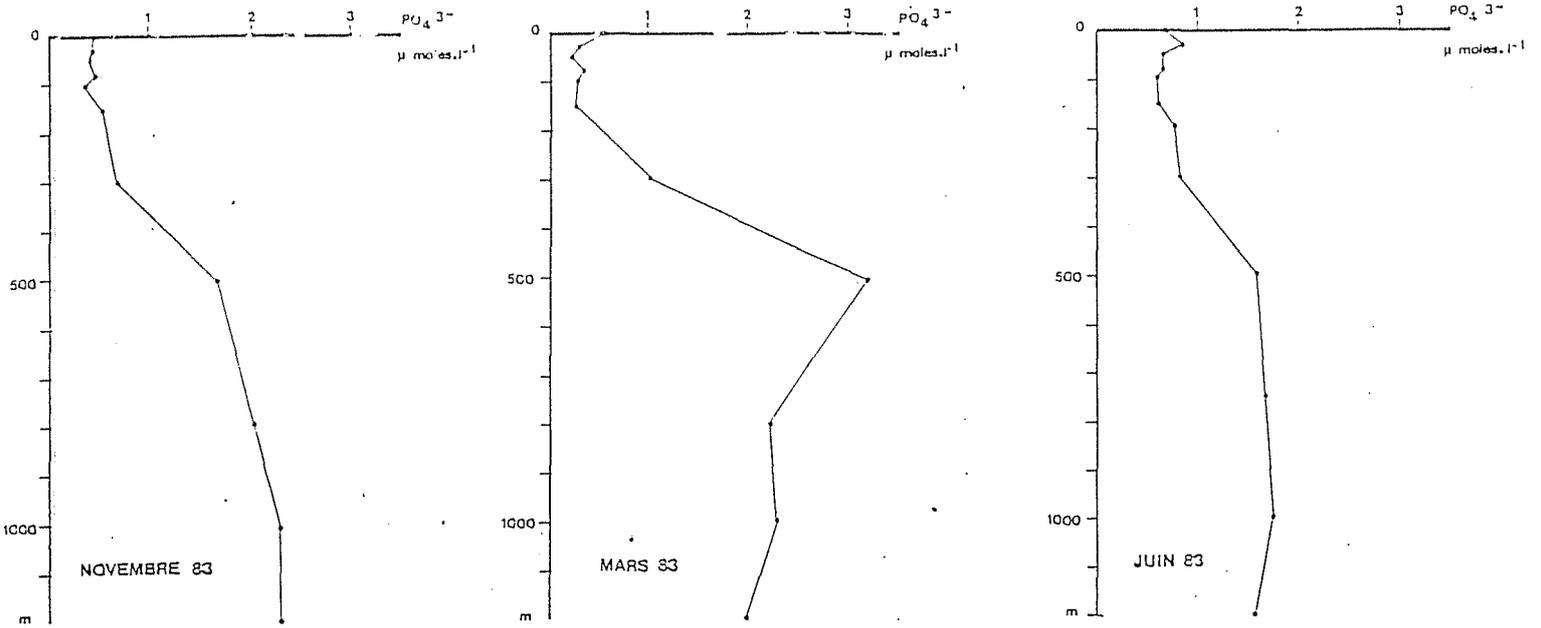


FIG 10 a.

VARIATIONS VERTICALES DES TENEURS EN SILICATES

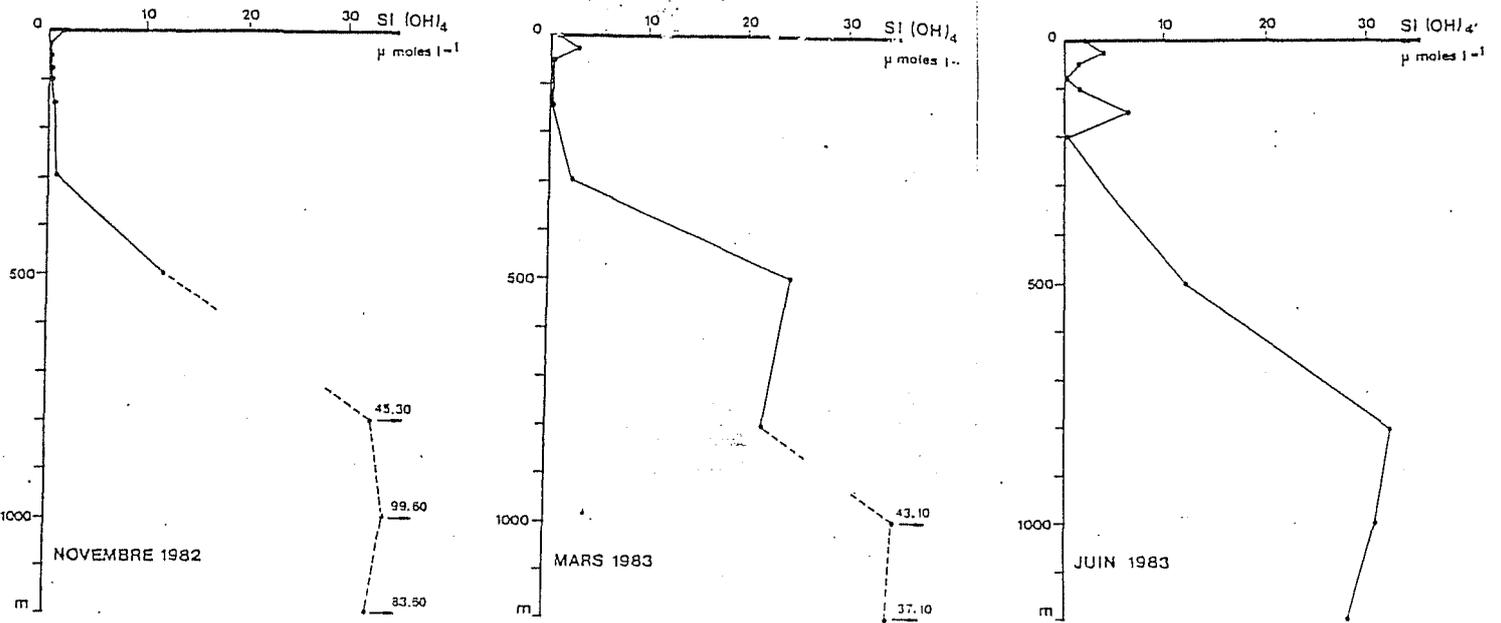


FIG 10. b.

(IN KESSLER ET MONBET, 1984)

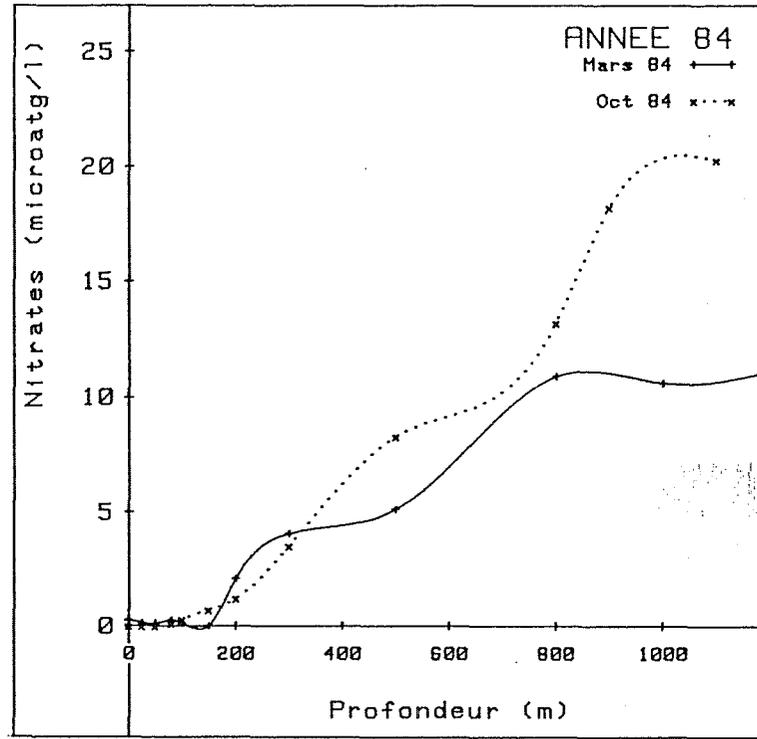
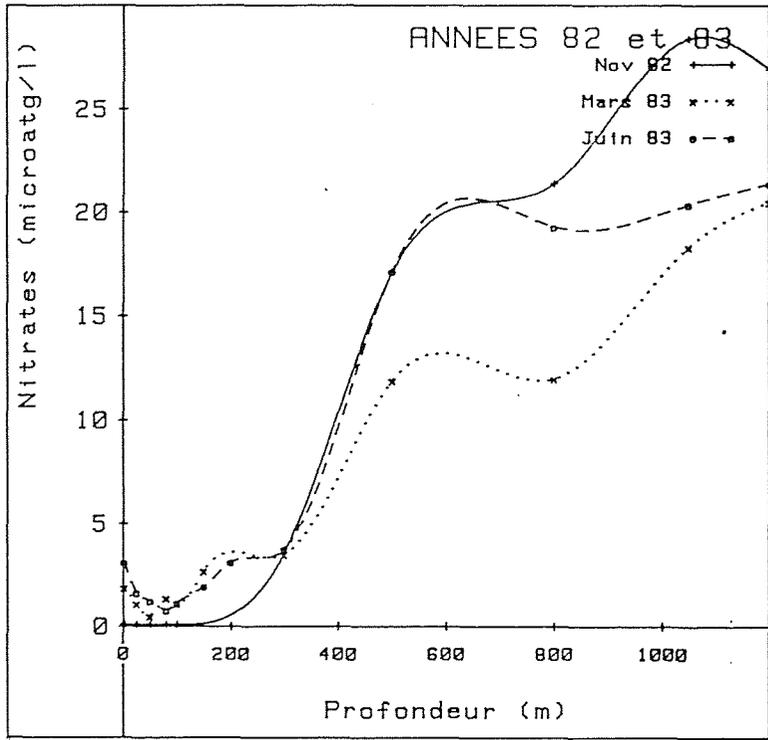


FIG JOC : VARIATIONS VERTICALES DES TENEURS EN NITRATES

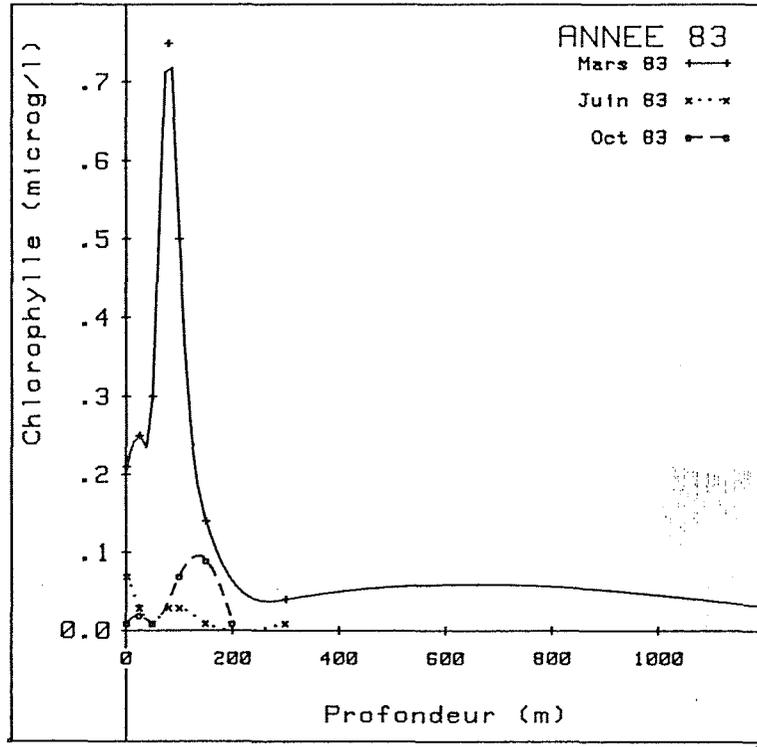
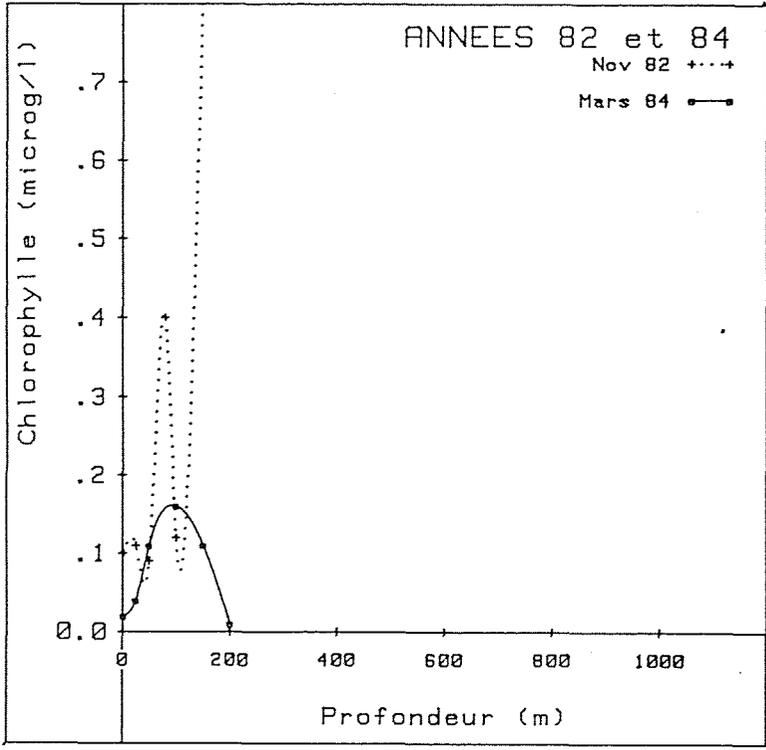


FIG 11: VARIATIONS VERTICALES ET TEMPORIELLES DES TENEURS EN CHLOROPHYLLE

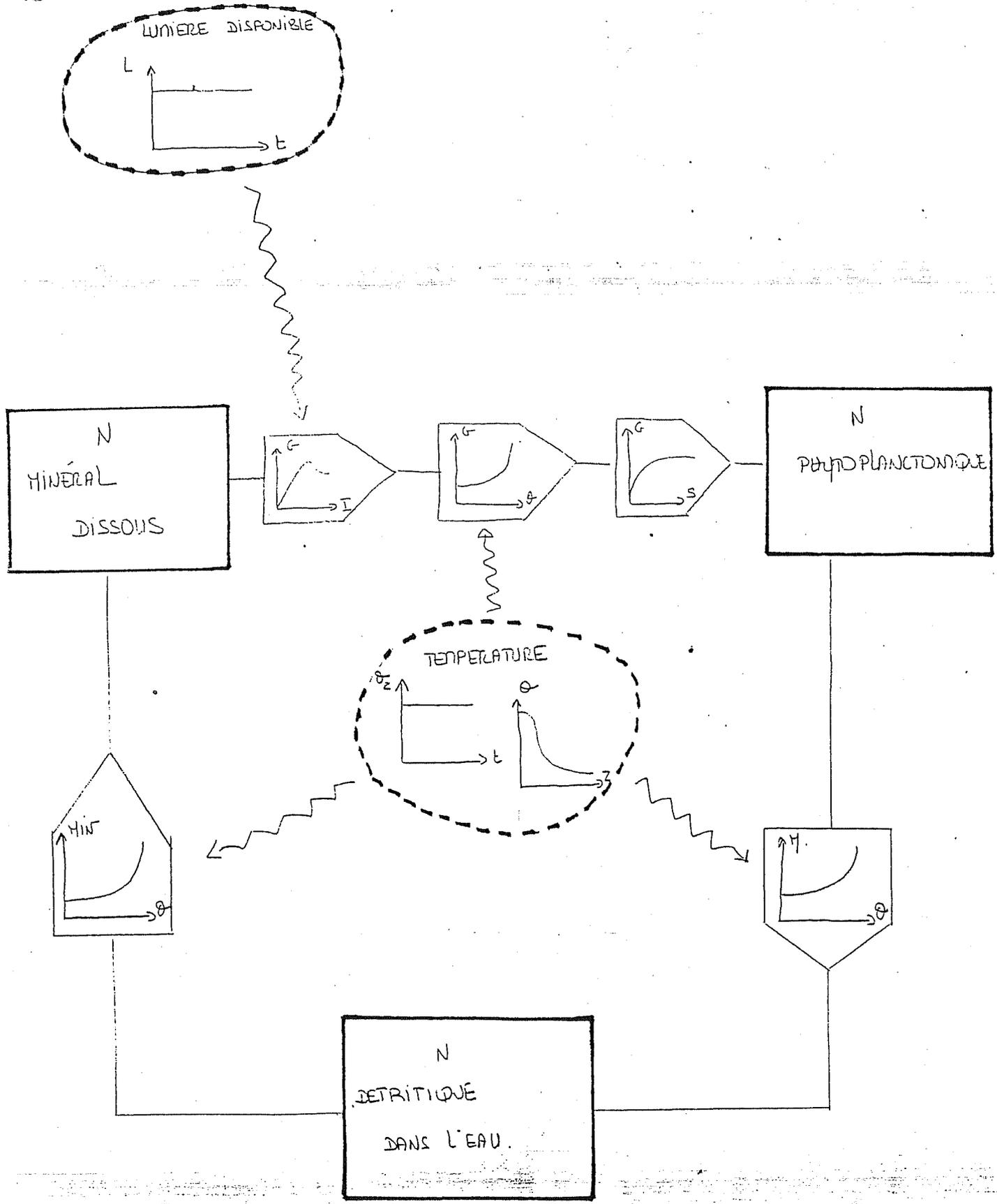


FIG. 12 - ORGANIGRAMME DU MODÈLE

II - MODELISATION DU MILIEU NATUREL

Introduction

Devant la complexité des facteurs intervenant dans l'équilibre de l'écosystème étudié, il a été choisi de dégager un schéma général de fonctionnement du système tropical plus qu'une modélisation détaillée du site. Les termes d'advection seront négligés en supposant le système homogène dans la dimension horizontale. De même les ondes internes sur lesquelles on ne possède pas suffisamment d'information ont été négligées.

Ce modèle simule donc l'évolution temporelle du cycle de l'azote sur une colonne d'eau à la station L2 (Fig 5).

A - DESCRIPTION DU MODELE

1) Représentation du système

La figure 12 résume les éléments qui composent le modèle.

- variables internes

. l'azote phytoplanctonique - Diatomées et dinoflagellés en sont les principaux représentants et seront les seuls considérés dans le choix des valeurs de paramètres. Des profils de Chl a mesurés pendant 2 ans serviront d'éléments de comparaison (Fig 10). Malgré les fortes fluctuations, on attend un profil moyen de 0,1 mg/m³ de chlorophylle en surface et de 0,4 mg/m³ au niveau du pic de chlorophylle. Le rapport N/Chl a été choisi égal à 16 (Eppley, 1973 - Oudot, 1978).

. l'azote minéral - Sachant que la croissance planctonique est essentiellement ^{azote} ~~nitrate~~ dépendante, on négligera les ~~nitrites~~, ~~ammonium~~, phosphates et silicates.

. l'azote détritique provient des éléments morts du phytoplancton. Les résultats de mesures dans le Pacifique occidental montrent que ces concentrations sont proportionnelles à celles du phytoplancton (*3). (Oudot, 1978).

4

- variables forçantes

. l'intensité lumineuse : une moyenne mensuelle des flux lumineux de surface a été calculée à partir de données météorologiques de Tahiti fournissant l'insolation journalière et le flux lumineux atmosphérique sur une période de 2 ans. Ses variations au cours de l'année sont très faibles (Fig 13).

. la température : des mesures faites à différents mois montrent que le profil reste relativement stable tout au long de l'année. Il en a été dégagé un profil moyen. Les valeurs à des profondeurs intermédiaires sont calculées par interpolation (programme d' A. Menesguen). (Fig. 14).

Si ces 2 facteurs ne varient pas dans le temps, on s'attend à ce que le système simulé évolue vers un état d'équilibre stable.

2) Evolution temporelle du système

Elle s'exprime sous la forme de 3 équations différentielles :

$$\cdot \frac{d N_{\text{phyto}}}{dt} = (\text{CROISSANCE} - \text{MORTALITEP}) * [N_{\text{Phyto}}]$$

$$\cdot \frac{d N_{\text{org}}}{dt} = \text{MORTALITEP} * [N_{\text{phyto}}] - \text{REMINERAL} * [N_{\text{org}}]$$

$$\cdot \frac{d N_{\text{min}}}{dt} = \text{REMINERAL} * [N_{\text{org}}] - \text{CROISSANCE} * [N_{\text{phyto}}]$$

CROISSANCE : taux de croissance phytoplanctonique

MORTALITEP : taux de mortalité " "

REMINERAL : taux de reminéralisation de la matière organique

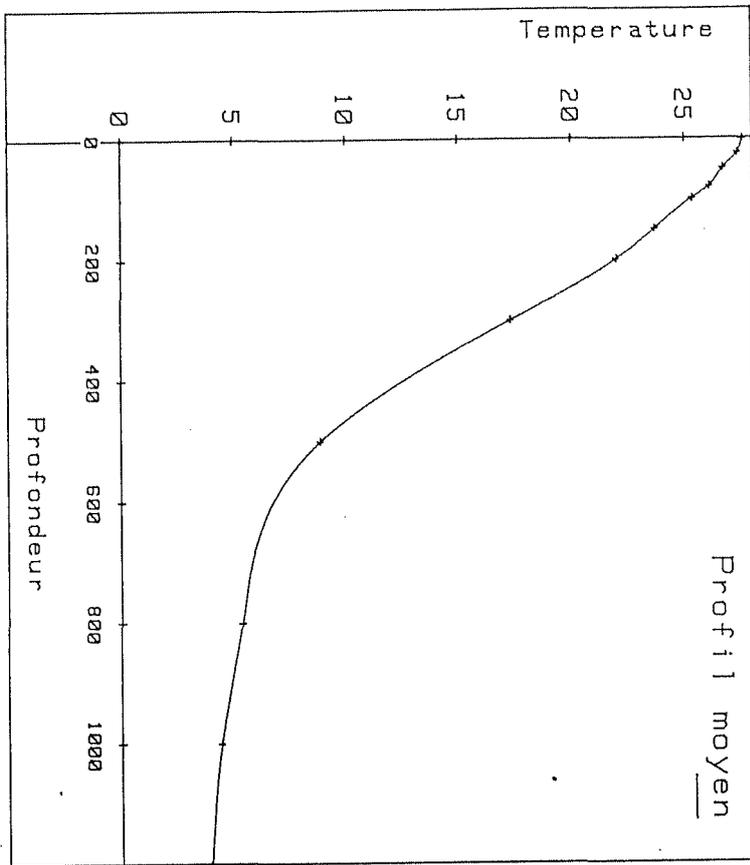


FIG. 14 :
 PROFIL MOYEN
 DE LA TEMPERATURE
 SUIVANT LA
 PROFONDEUR.

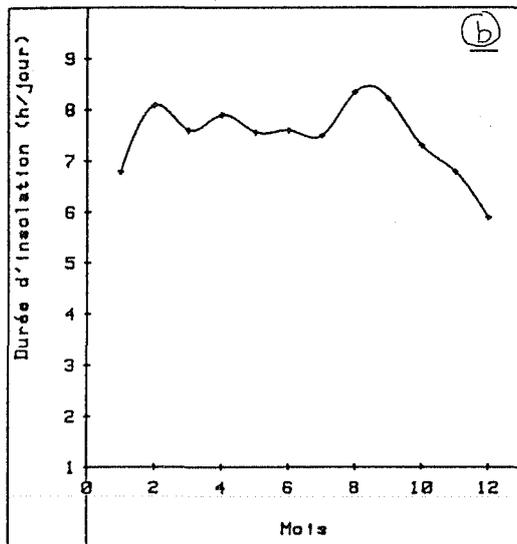
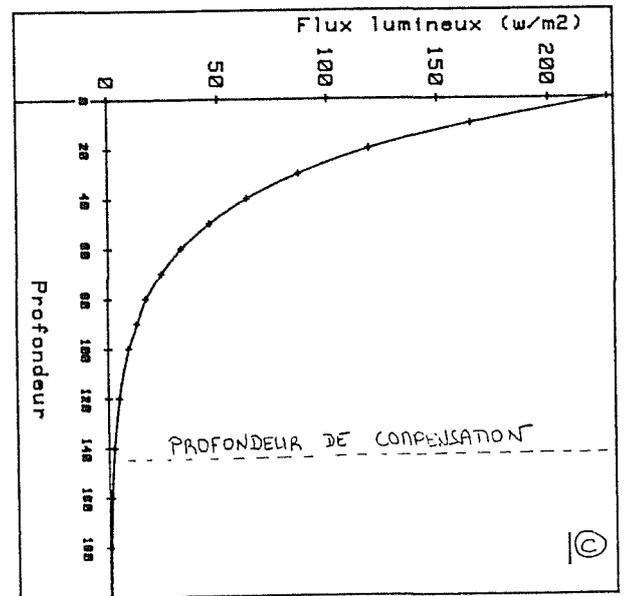
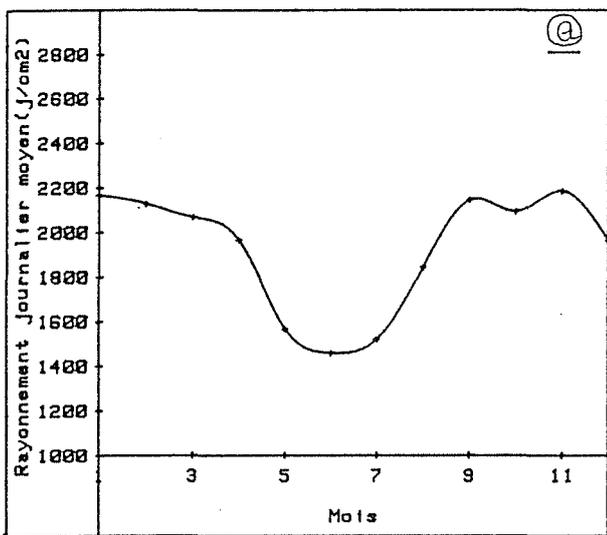


FIG 13 - (a) : VARIATIONS SAISONNIÈRES DU
 RAYONNEMENT JOURNALIER
 (b) : - - DE LA DURÉE D'INSOLATION
 (c) : EXTINCTION DE LA LUMIÈRE
 AVEC LA PROFONDEUR

[Nphyto] : concentration en phytoplancton
 [Norg] : - - azote detritique
 [Nmin] : - - azote mineral dissous

Evolution du phytoplancton

La croissance phytoplanctonique peut se formuler ainsi :

$$\text{CROISSANCE} = G_{\text{max}} * \text{FACTLUM} * \text{FACTNUT}$$

Gmax -- taux de croissance maximale, fonction exponentielle de la température (Eppley, in Kremer et Nixon, 1978) (Fig 15a).

$$G_{\text{max}} = G_{\text{max } 0^{\circ}\text{C}} * \text{EXP} (a * T)$$

a : taux d'augmentation des vitesses dû à la température

FACTLUM -- La lumière agit sur la photosynthèse selon la formulation de Steele, dans laquelle intervient l'intensité optimale de croissance spécifique des individus (Iopt) (Fig 15b)

$$G_{\text{max}} = G_{\text{max } 0^{\circ}\text{C}} * \frac{I}{I_{\text{opt}}} * \text{EXP} \left(1 - \frac{I}{I_{\text{opt}}} \right)$$

i : intensité lumineuse incidente

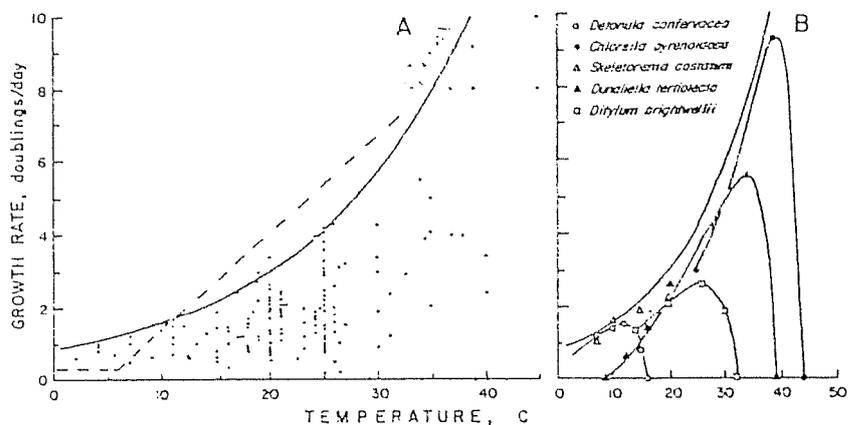
La formule utilisée dans le modèle est la solution analytique de l'intégration de l'équation de Steele en fonction de la profondeur, lorsque I varie au cours du temps (Di Toro, in Kremer et Nixon, 1978) :

$$G_{\text{max}} = G_{\text{max } 0^{\circ}\text{C}} * \frac{e \cdot f}{k \cdot z} * \left(\exp \left[\left(- \frac{I}{I_{\text{opt}}} \right) \cdot \exp (- k \cdot z) \right] - \exp \left(- \frac{I}{I_{\text{opt}}} \right) \right)$$

f : photopériode

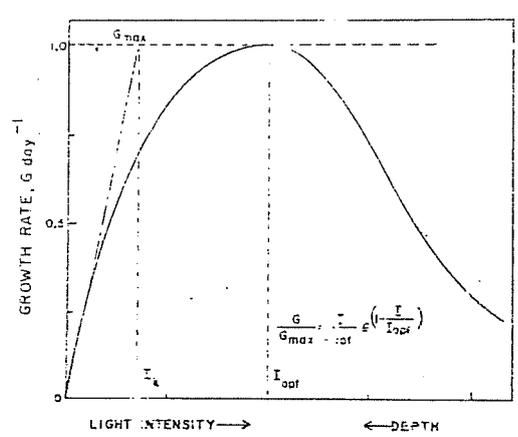
z : profondeur d'intégration

k : coefficient d'extinction de la lumière



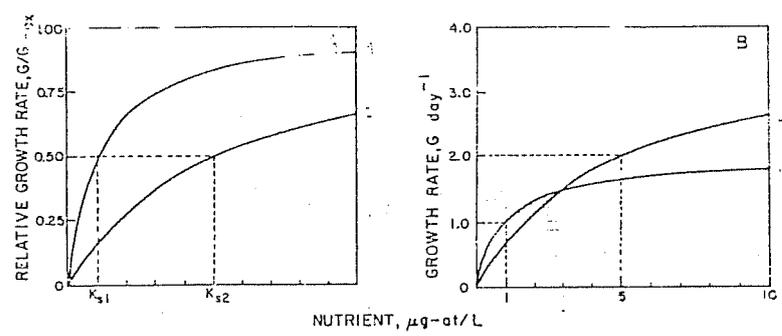
Ⓐ ACTION DE LA TEMPERATURE SUR LE TAUX DE CROISSANCE DU PHYTOPLANKTON

Fig. 15 A and B. Temperature response of phytoplankton growth rate. (A) Measurements of maximum specific growth rate in doublings per day for laboratory cultures largely in continuous light (Eppley, 1972). Solid line: hypothetical maximum Eq. (7) used in most simulations. Dashed line: used in some runs of the model to represent a second, warm-water species-group. (B) Observations of specific growth rates for five species of unicellular algae demonstrating patterns of thermal optima which underlie the hypothetical maximum (Eppley, 1972)



Ⓑ INFLUENCE DE LA LUMIERE SUR LA CROISSANCE PHYTOPLANKTONIQUE

Fig. 17. Theoretical formulation for the instantaneous photosynthesis-light response of phytoplankton (Steele, 1962). The normalized Eq. (12) predicts growth relative to the maximum as a function of the ratio of the incident and the optimum light intensity. I/I_{opt} . Some experimental observations demonstrate a plateau with little or no high light inhibition. In such cases, another measure of light response may be used, with I_k defined as the intersection of the initial slope of the hyperbola with the maximum growth rate



Ⓒ INFLUENCE DE LA NUTRITURE SUR LA CROISSANCE

Fig. 16 A and B. Hyperbolic response of phytoplankton growth to a limiting nutrient. The half-saturation constants (K_s) are defined as the concentration at which growth is one-half the maximum. When growth is normalized to a maximum of 1.0, conclusions about the relative competitive advantage of species may be unwarranted. Species 1, with the lower K_s , appears totally dominant in the normalized representation (A). Consideration of actual growth rates, however, reveals that species 2 grows faster at nutrient levels above $3 \mu\text{g-at/L}$ (B)

FIG 15: EFFETS DE DIVERS FACTEURS SUR LA CROISSANCE (IN KREYER ET MIXON, 1978)

FACTNUT -- Les sels nutritifs ont un effet hyperbolique , que Monod a formulé suivant la cinétique de Michaelis-Menten (Fig 15c).

$$G = G_{max} * \frac{S}{S + K_s}$$

S : concentration en sel nutritif

Ks: constante de demi saturation pour le sel considéré
Ici, seuls les nitrates ont été pris en compte.

MORTALITEP -- le taux de mortalité est une exponentielle de la température . Elle constitue ici le terme de fermeture du modèle en englobant tous les phénomènes appartenant aux niveaux supérieurs.

$$MORTALITEP = MORTALITE \theta^{\circ C} * \exp (b * T)$$

Evolution de la matière organique

C' est la quantité de matière qui a été rejetée par les niveaux précédents , à laquelle se soustrait une fraction reminéralisée.

Evolution de l'azote minéral

La reminéralisation est une exponentielle de la température

$$REMINERAL = REMIN \theta^{\circ C} * \exp (a . T)$$

Le jeu de paramètres

Bien que la biologie du plancton tropical soit peu connue, plusieurs études ont cependant permis de dégager des constantes spécifiques qui ont donc été choisies comme paramètres de base dans les premières simulations . Une calibration manuelle nous a ensuite amenés à les modifier de façon à ajuster au mieux

le modèle. (Tableau dans Fig 16).

Les conditions initiales

Pour amorcer la simulation, les profils mesurés de Chl_a et d'azote minéral sont entrés comme valeurs initiales des variables d'état. L'azote détritique est considéré comme nul au départ. (Fig 16). Un programme d'interpolation (A.Ménesguen) permet d'estimer à partir de ces profils les valeurs à des niveaux intermédiaires.

3) représentation spatiale

Elle fait partie intégrante d'un logiciel de modélisation développé par A. MENESGUEN et peut se résumer ainsi :

La méthode consiste à découper la colonne d'eau en une série de boîtes dont le contenu est supposé homogène. La connaissance des échanges possibles entre les boîtes permet d'établir le bilan des composants dans chacune d'elles.

Ainsi, la colonne de 1200m a-t-elle été compartimentée en 10 boîtes de 20 m de hauteur dans la couche supérieure, là où l'activité biologique est la plus intense, et 10 boîtes de 100 m pour la couche aphotique .Chacune a une section de 1 m² (Fig 17)

Deux types d'échanges sont considérés :

- échanges par diffusion turbulente
- échanges par sédimentation

a - la diffusion turbulente

L'existence d'un gradient ~~écouant~~ courantologique et thermique entre deux profondeurs crée des turbulences favorables à des mouvements ascendants de matière. Aussi, sur la base de courants horizontaux mesurés à 5 profondeurs différentes (20, 130, 330, 645, 950 m) sur une période de 5 jours représentative du comportement moyen des masses d'eau, on a voulu connaître l'ampleur de cette diffusion en calculant les coefficients de

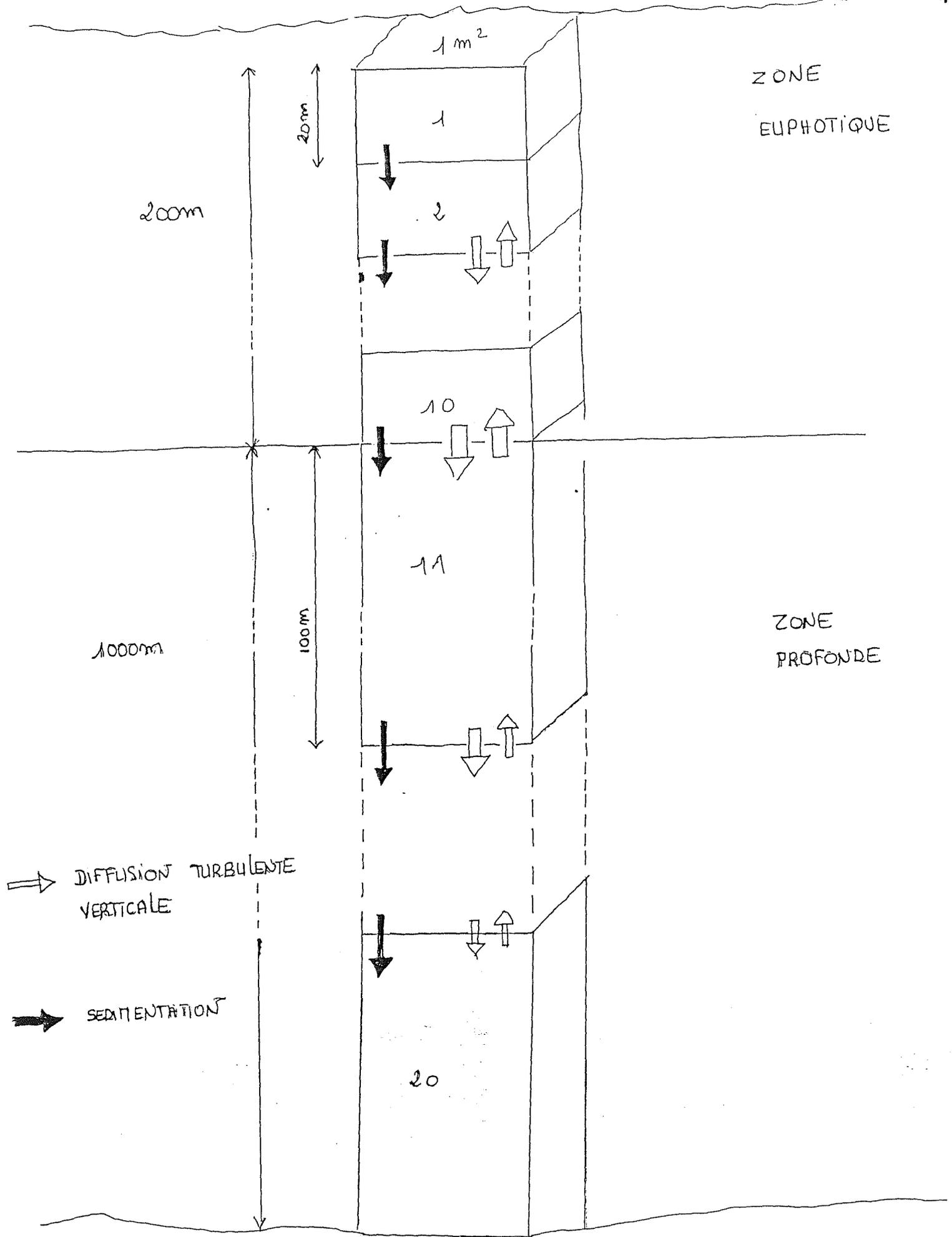


FIG. 17: REPRÉSENTATION SPATIALE DU MODÈLE

diffusion turbulente moyens dans les 4 couches délimitées précédemment.

Ce calcul nécessite la détermination des flux verticaux turbulents à partir des nombres de Richardson de gradient Ri et de flux Rf définis par (Mellor et Yamada, in Du Penhoat, 1979):

$$Ri = \frac{g * b * dT/dz}{(du/dz)^2 + (dv/dz)^2}$$

- b : coefficient d'expansion thermique
- g : accélération de la pesanteur
- dT/dz : gradient de température
- du/dz : gradient de vitesse dans une direction
- dv/dz : gradient de vitesse dans la direction perpendiculaire

$$Rf = 0,725 (Ri + 0,186 - (Ri^2 - 0,316 Ri + 0,0346)^{1/2})$$

Les coefficients de diffusion turbulente sont donnés par :

$$Km = L . e . Sm$$

$$Kh = L . e . Sh$$

- où - Sm et Sh sont des fonctions de stabilité dépendant de Rf.
- e l'énergie cinétique turbulente déterminée par

$$e = Sm . (\frac{du^2}{dz} + \frac{dv^2}{dz}) - g . b . Sh . \frac{dT}{dz}$$

- L : échelle de longueur calculée par

$$L = 0,1 * \frac{\int_z e . |z| . dz}{\int_z e . dz}$$

Ces formules Km et Kh ne s'appliquent que dans le cas de nombres de Richardson < 0,23. Elles s'utilisent en général sur des épaisseurs assez faibles (qq m à qq dizaines de m). Dans notre cas, le calcul de Ri fournissant des valeurs très grandes (6 < Ri < 300), ces formules ont servi à calculer un Km0 correspondant à un Ri nul (le gradient de température est supposé nul), à partir duquel le coefficient de diffusion Km a été estimé par

$K_m = K_{m0} \cdot (1 + \alpha \cdot R_i^{-\beta})$ (Patrice Klein, com. pers.)
avec $\alpha = 3$ et $\beta = 2$.

Les courants au large de Tahiti sont fortement dépendants des marées, les vitesses étant le plus souvent < 30 cm/s, aussi les coefficients de diffusion turbulente obtenus sont-ils très faibles:

prof. (m)	75	230	487,5	797,5
K_m (cm ² /s)	1,78	0,5	0,028	0,015

L'échange par diffusion entre deux cellules I et J est donné par :

$$Q_{ij} = K \cdot S \cdot \frac{(C_i - C_j)}{dx} \quad (\text{in Lepetit, 1979})$$

k : coefficient de diffusion

S : surface d'échange

C : concentration d'un élément donné dans les boîtes I et J

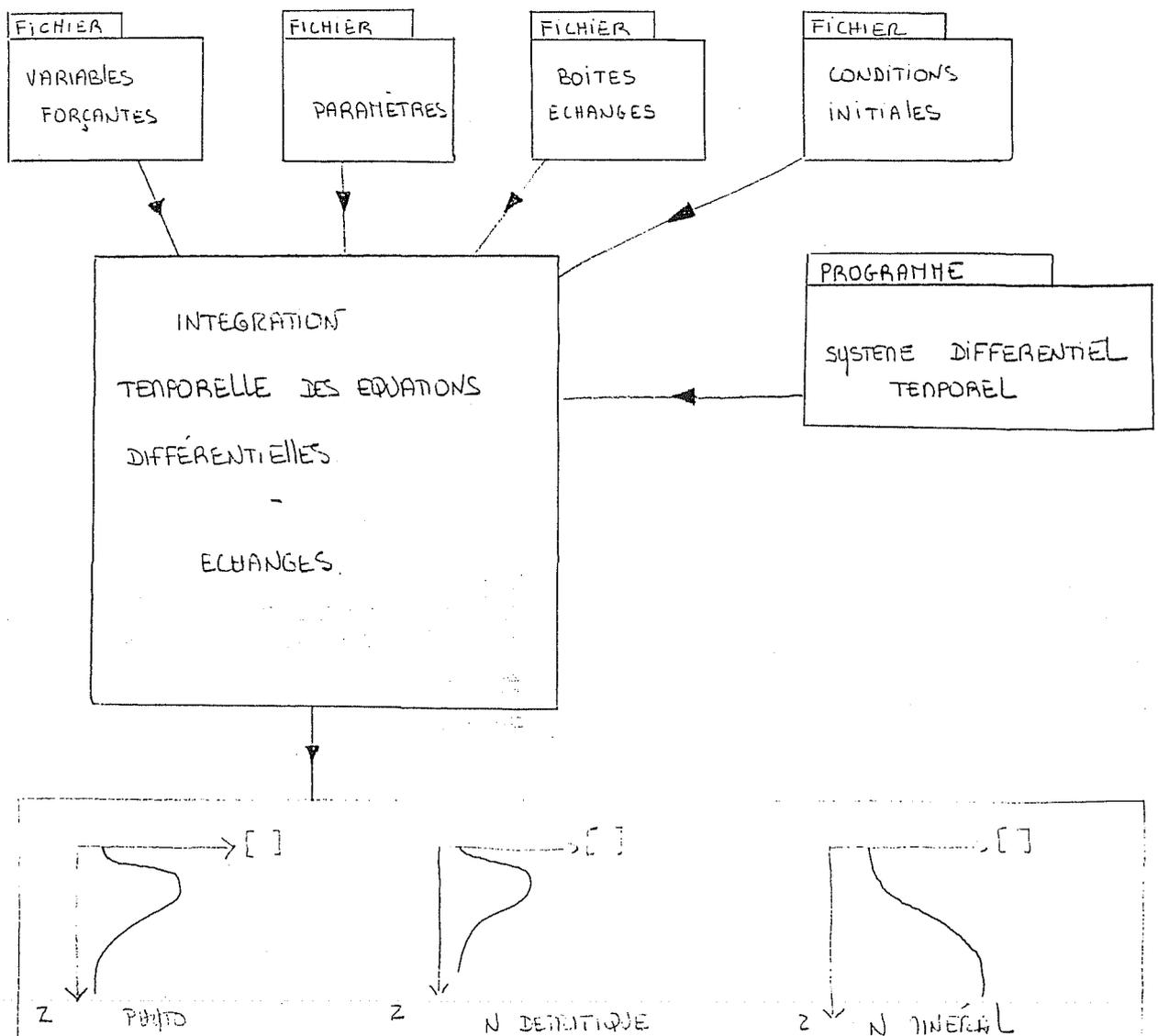
dx : distance entre les centres des 2 boîtes

b - La sédimentation

On sait que les particules sont soumises à un phénomène de sédimentation. Le phytoplancton tropical est de taille très réduite et son coefficient de sédimentation varie de 0 à 40 cm/j. (Bienfang, 1985). Différentes valeurs intermédiaires seront considérées (10, 20, 30, 40). Au sein de chaque boîte, la quantité de constituant perdue ou rentrée s'obtient par le calcul d'un flux à travers la surface du fond.

4) La simulation : description du logiciel

Le système est simulé grâce à un logiciel développé par Mr Alain MENESGUEN. Dans un premier temps, les descripteurs du système sont enregistrés sur des fichiers (paramètres, variables forçantes, définition des boîtes et échanges, conditions aux limites et initiales dans chaque boîte). L'utilisateur doit créer un sous-programme de définition du système différentiel. A partir de ces données, le logiciel procède à l'intégration spatio-temporelle des équations par une méthode de Runge-Kutta à pas variable et calcule les échanges entre boîtes. Les simulations se déroulent sur une période variable conditionnée par l'aboutissement à un état d'équilibre stable. Le pas de temps maximal est fixé par l'utilisateur. Les résultats obtenus sont visualisés grâce à un programme de tracé de courbes.



B - RESULTATS OBTENUS

Dans un premier temps, on a voulu comprendre le fonctionnement du système biologique seul, sans intervention des facteurs physiques (sédimentation, diffusion).

Une première simulation fixe les variables forçantes comme constantes dans le temps: la température par le profil moyen (Fig 14), la lumière par un flux moyen journalier incident de 227 W/m² à la surface de l'eau pour une photopériode de 12h. La couche d'eau s'équilibre au bout de 3 mois environ sur un profil représentatif du milieu tropical (Fig 18). La chlorophylle s'étend sur une épaisseur de 140m et possède un maximum subsuperficiel entre 80 et 100m. Les eaux sont claires et l'auto-ombrage inexistant. Aussi les cellules phytoplanctoniques se développent-elles plus profondément. La quantité de chlorophylle (< 0.25 mg/m³) s'apparente aux observations faites dans les eaux avoisinantes et dans d'autres régions tropicales. (Gundersen et Al, 1976 - Oudot, 1978).

Il faut remarquer cependant qu'en dessous du pic d'abondance, la chlorophylle disparaît beaucoup plus vite dans la simulation. L'azote minéral consommé en subsurface se trouve en quantité infime dans la couche euphotique (< 0.1 mg/m³) tandis que le profil en profondeur reste inchangé. Ces valeurs de surface sont aussi plus faibles que ce que l'on observe généralement.

L'azote détritique est abondant du fait d'une forte mortalité planctonique. Son profil épouse celui de la chlorophylle.

Ces résultats illustrent le comportement des milieux oligotrophes. le développement de plancton dépend de la disponibilité en nitrates. La reminéralisation est relativement lente et l'azote minéral est consommé au fur et à mesure de sa production, limitant ainsi les potentialités de croissance phytoplanctoniques.

L'introduction des variations saisonnières de la lumière modifie légèrement le profil qui se stabilise sur une trajectoire sinusoïdale d'amplitude faible permettant de négliger l'effet saisonnier dans les simulations ultérieures (Fig 19).

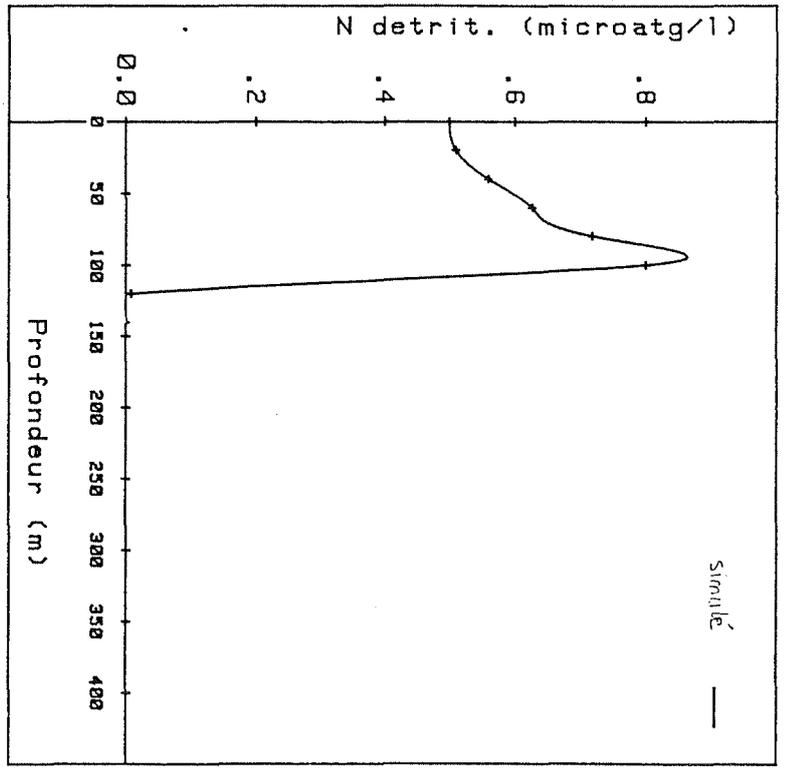
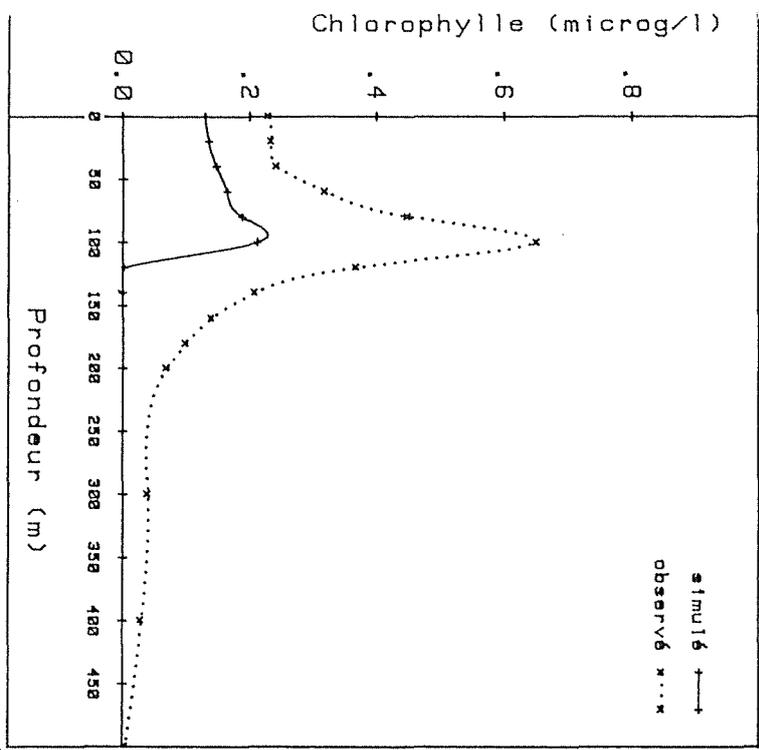


FIG. 18: RESULTATS DE
LA SIMULATION BIOLOGIQUE
SEULE

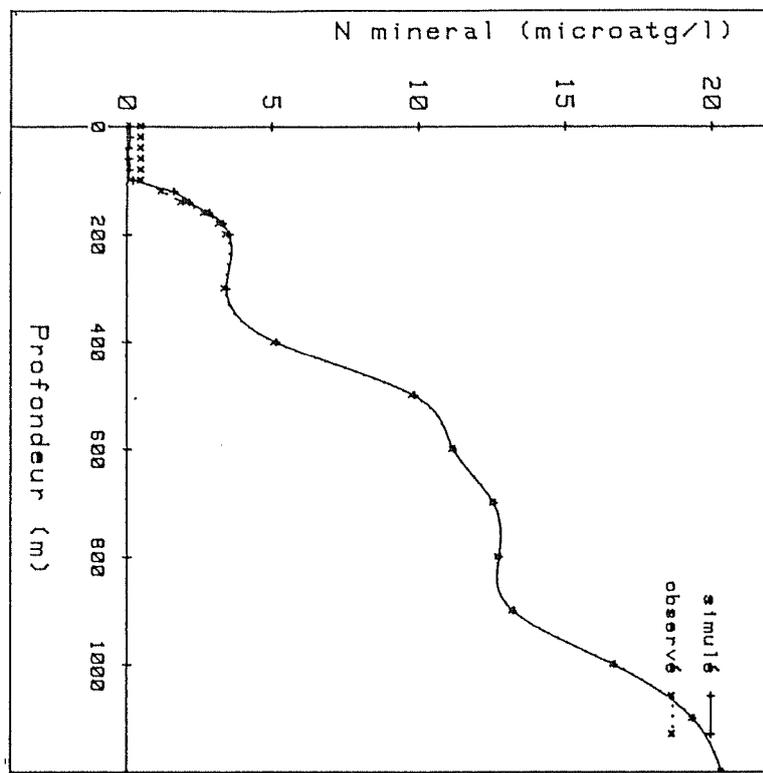


FIG 18 - (suite)

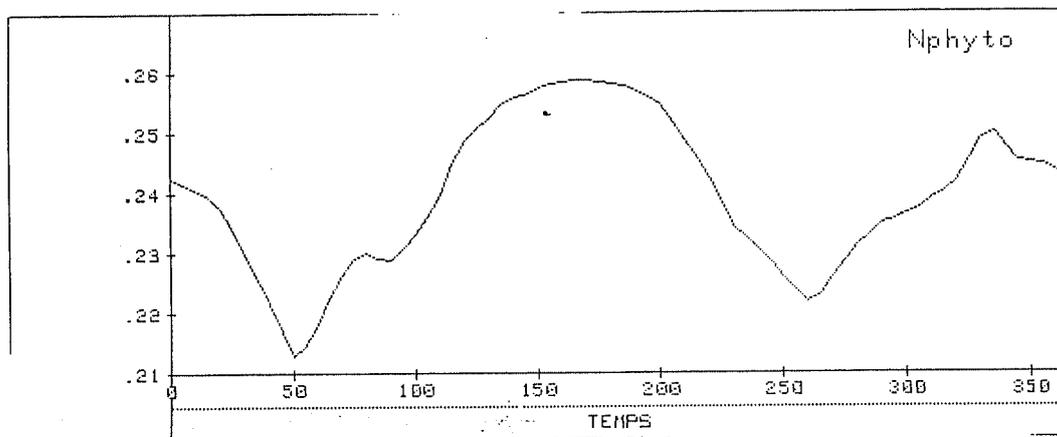


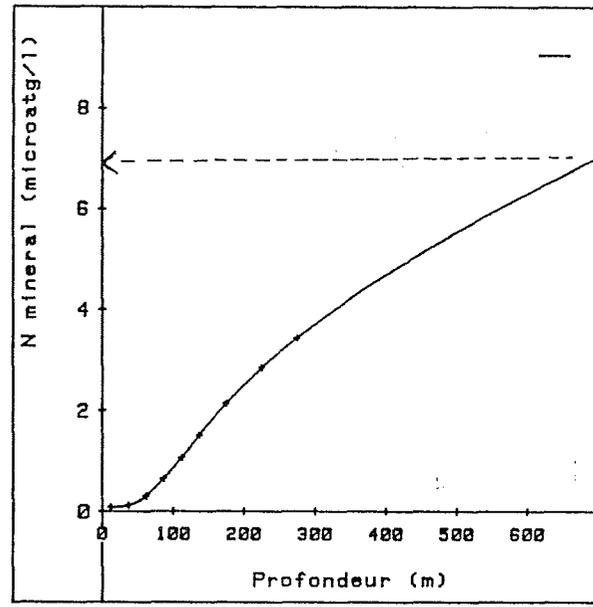
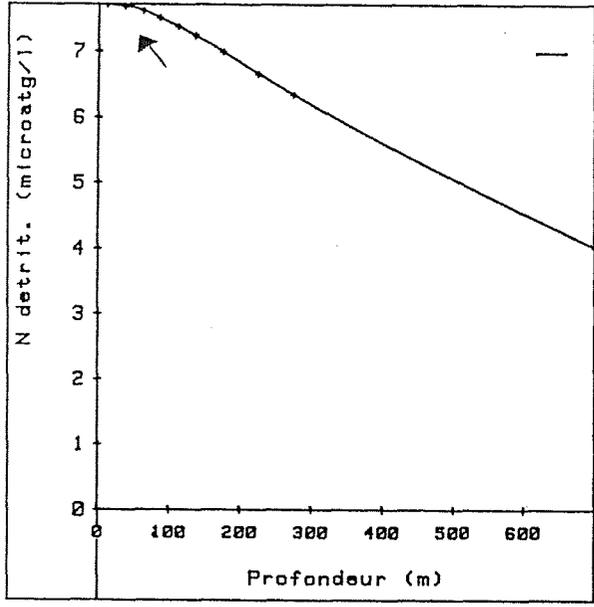
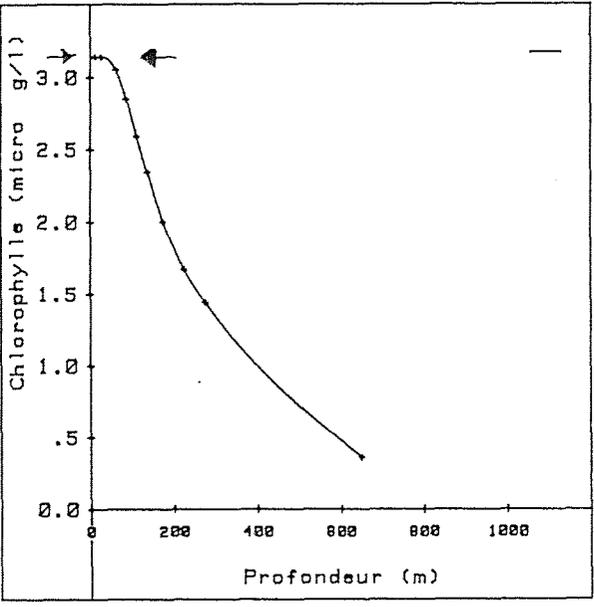
FIG 19: VARIATIONS SAISONNIÈRES DE LA CHLOROPHYLLE
 AU NIVEAU DU PIC MAXIMUM, INTRODUITES PAR
 UNE VARIATION SAISONNIÈRE DE LA LUMINOSITÉ
 PROFONDEUR = 80m -

La prise en compte des phénomènes physiques introduit une perturbation importante de cet équilibre très sensible à l'intensité relative de la sédimentation et de la diffusion turbulente.

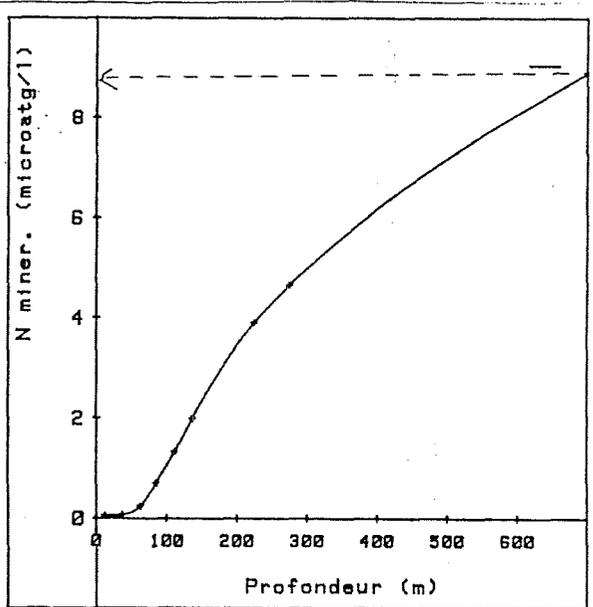
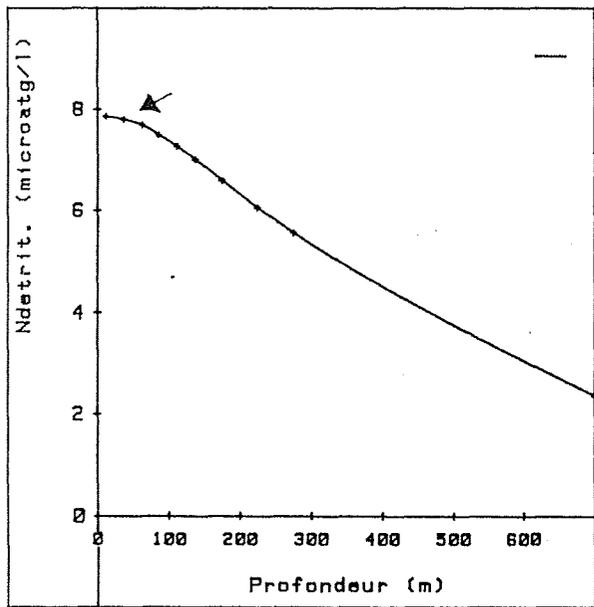
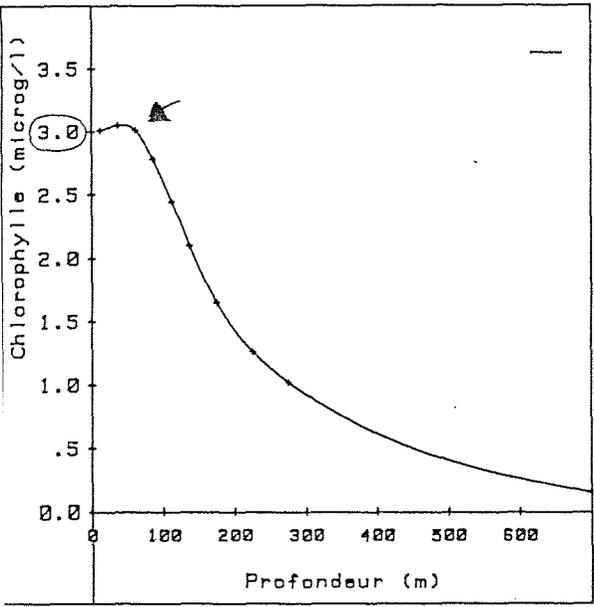
Les conditions initiales étant fixées par le profil d'équilibre biologique, on observe une diminution de phytoplancton dans les couches de surface et un renforcement du pic de chlorophylle entre 80 et 100 m. Le profil devient plus pointu. (Ex. Fig. 24) Parallèlement, les nitrates situés vers 500-600 m de profondeur migrent vers la surface sous l'effet de la diffusion verticale et suscitent ainsi une croissance accrue au niveau du maximum. (Ex. Fig. 24) Une diffusion très forte homogénéise la masse d'eau en azote minéral et induit une forte croissance planctonique. (Fig. 20). Dans le cas qui nous intéresse, la diffusion verticale est très faible, mais suffit à faire remonter lentement les nitrates de la couche intermédiaire (Fig. 21). L'apport de nourriture en surface favorise la croissance. Bien que les coefficients de diffusion soient très faibles, leur effet se fait sentir du fait d'une "avidité" relative du plancton vis à vis de l'azote minéral. (Fig. 21).

La sédimentation intervient comme facteur négatif en entraînant le plancton vers le fond où il meurt et se trouve converti en azote minéral, d'où une augmentation de celui-ci vers 300-400 m. (Fig. 22). Combinée avec la diffusion, elle prédomine en début de simulation, puis se trouve masquée ensuite par la diffusion. On observe alors une croissance régulière de chlorophylle, plus ou moins lente suivant l'intensité de la sédimentation. La pente est d'autant plus forte que la sédimentation est faible.

Le phénomène est très lent et ne parvient pas à un état d'équilibre au bout de 38 ans. (Fig. 23). Afin de connaître rapidement celui-ci, on a introduit en valeurs initiales le profil de chlorophylle attendu, celui d'azote détritique correspondant ($Chl a * 3$) et le profil d'azote minéral obtenu au bout de 38 ans de simulation. On obtient alors en 2 ans un équilibre stable. Celui de la chlorophylle est d'autant plus accentué que la



$$K_2 = 1000 \text{ cm}^2 / \text{s}$$



$$K_2 = 500 \text{ cm}^2 / \text{s}$$

FIG 20 : INFLUENCE D'UNE FORTE DIFFUSION TURBULENTE VERTICALE SUR LE SYSTEME BIOLOGIQUE

FIG 21: RÔLE DE LA
DIFFUSION MESURÉE IN SITU
 $(K_2 = 1,78 \text{ cm}^2/\text{s})$ SUR
 LE SYSTÈME, DANS CHAQUE
 DES BOÎTES.

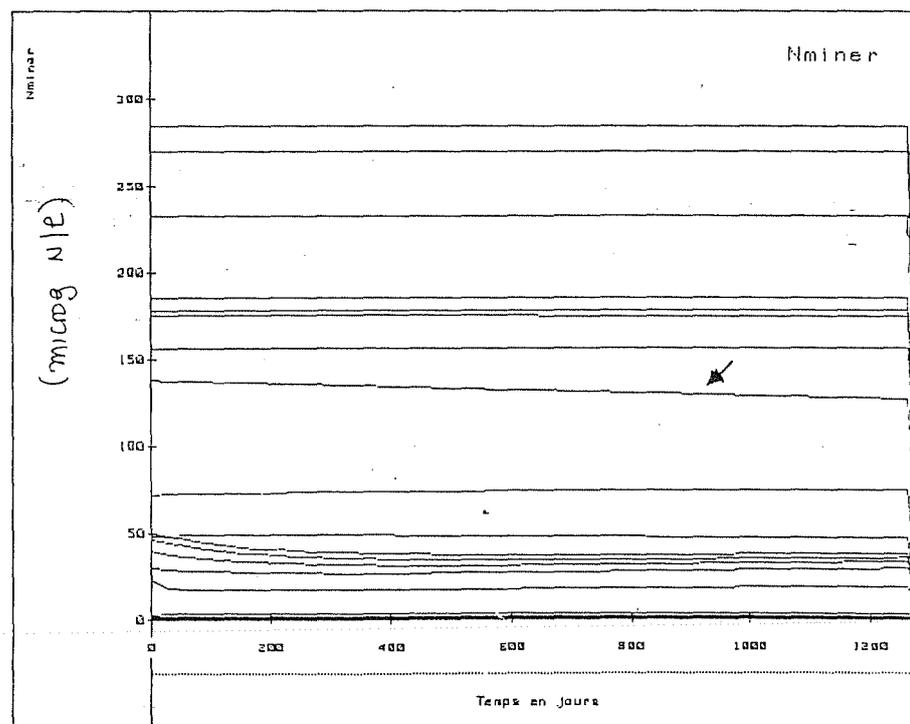
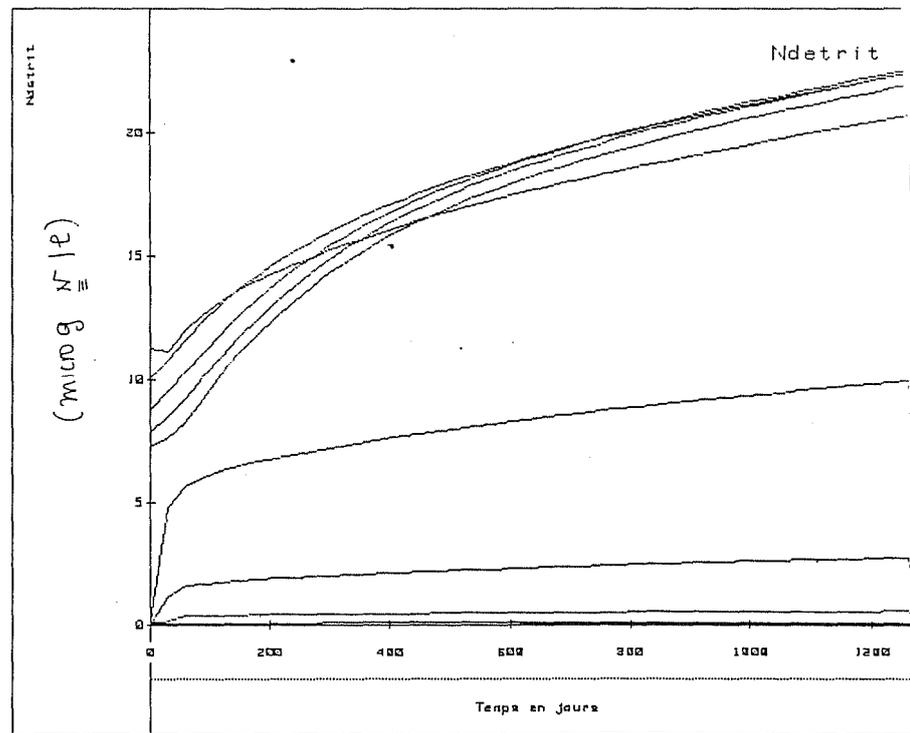
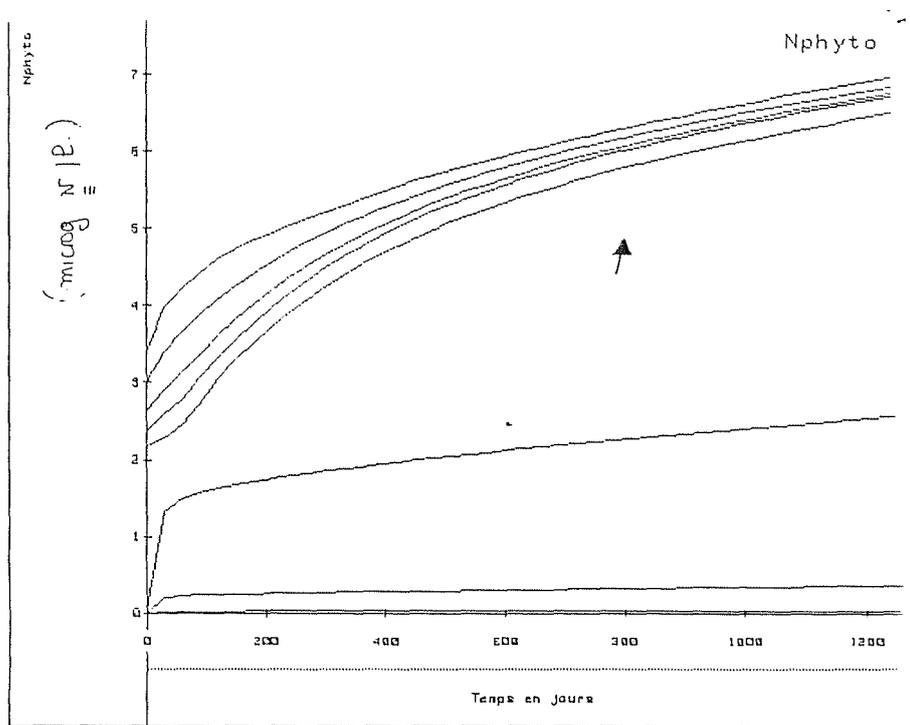
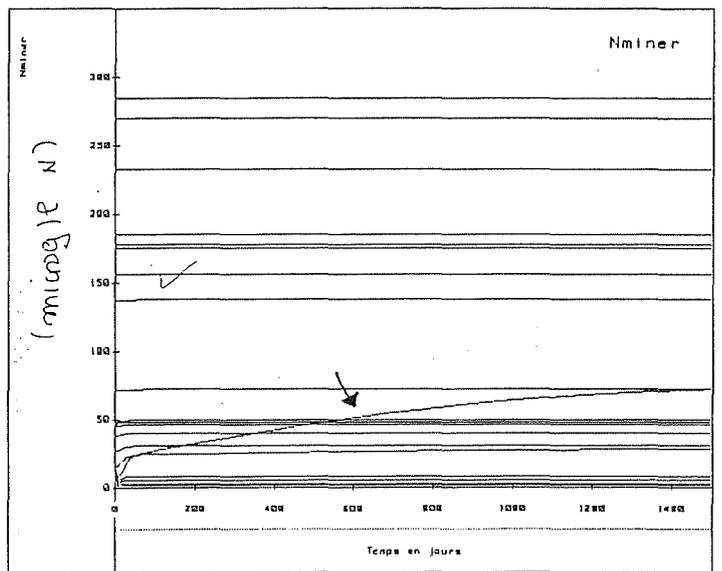
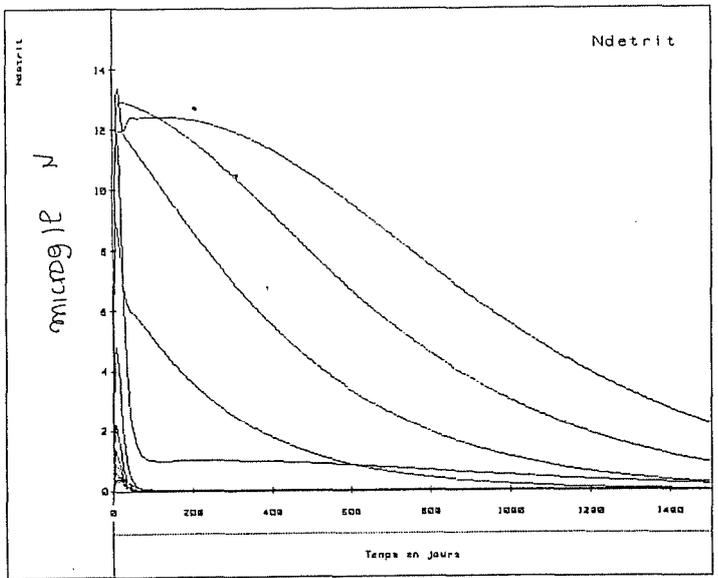
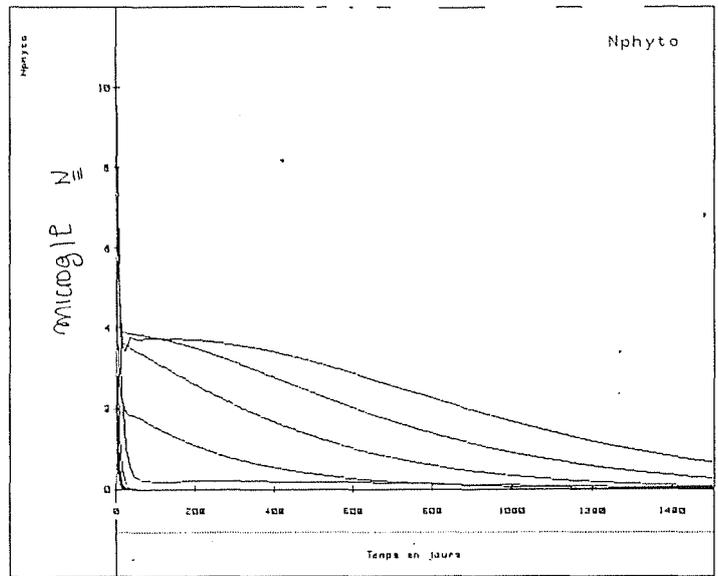


FIG 22: INFLUENCE
 DE LA SEDIMENTATION
 $w = f(u) \cdot J$



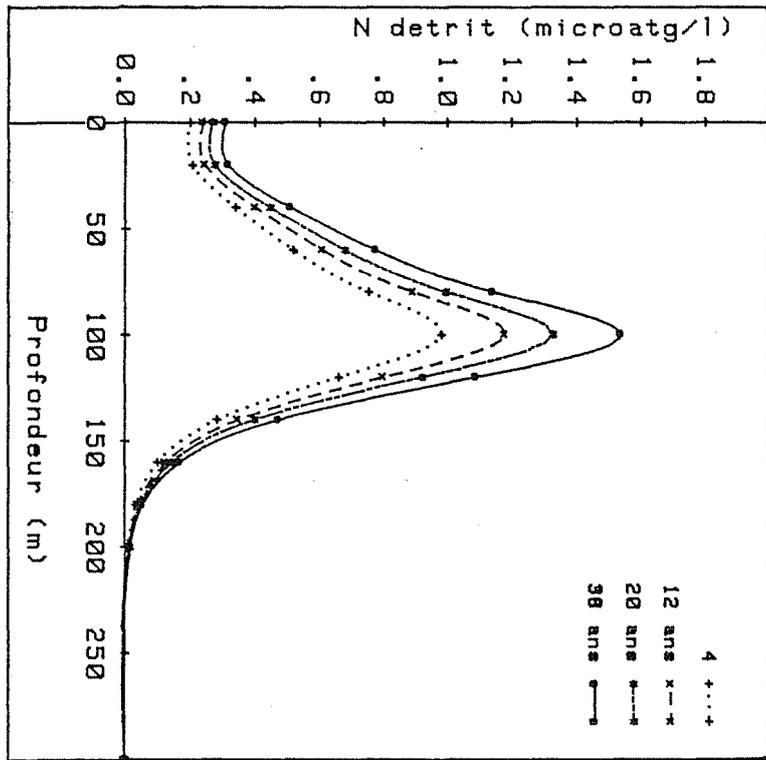
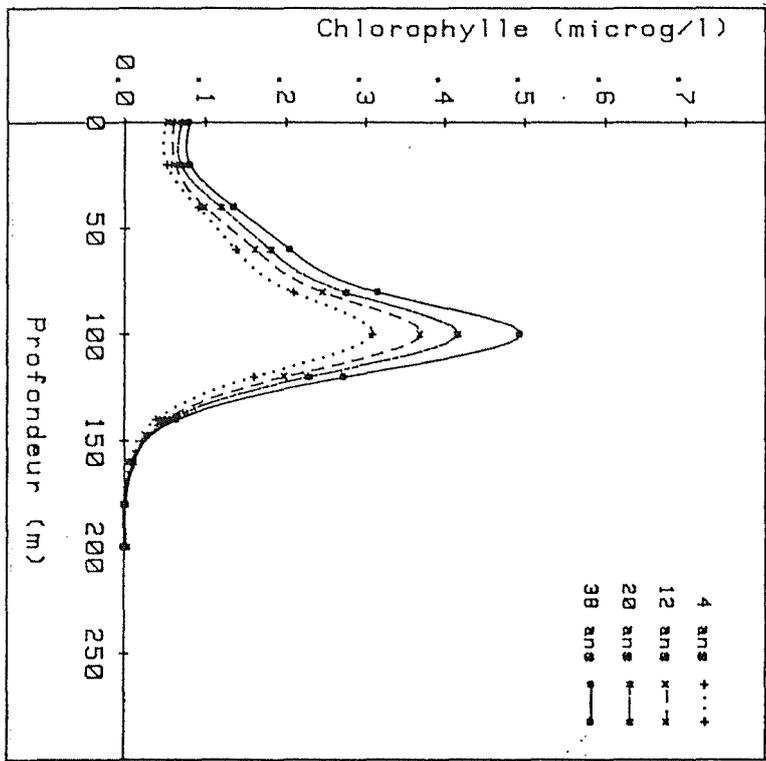


FIG 23: EVOLUTION
TEMPORELLE DU PROFIL DU
SYSTEME

$$\left\{ \begin{array}{l} v. \text{ SEDIMENTATION} = 40 \text{ cm } / \text{ J} \\ K_2 = 1,78 \text{ cm}^2 / \text{ s} \end{array} \right.$$

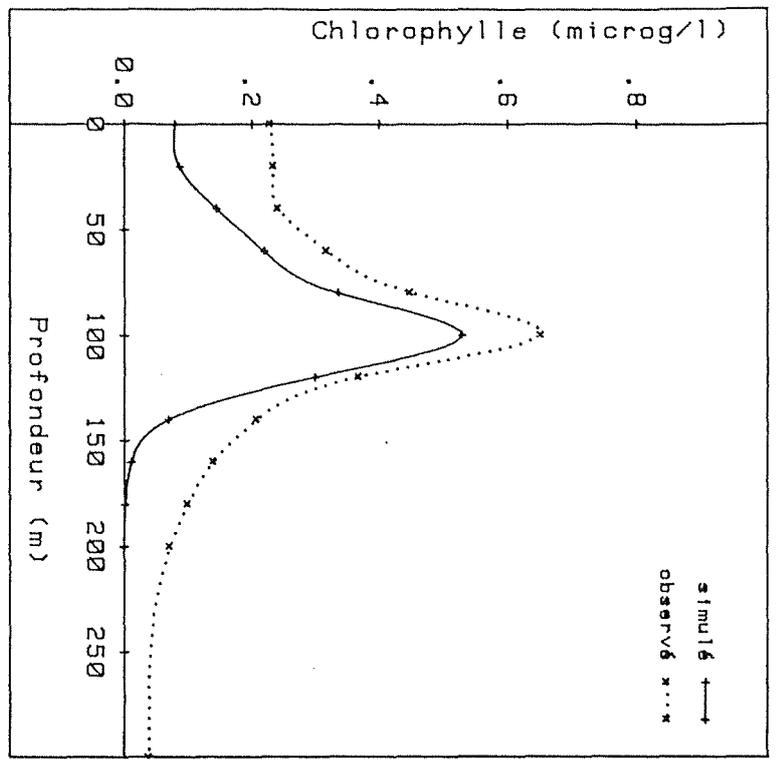
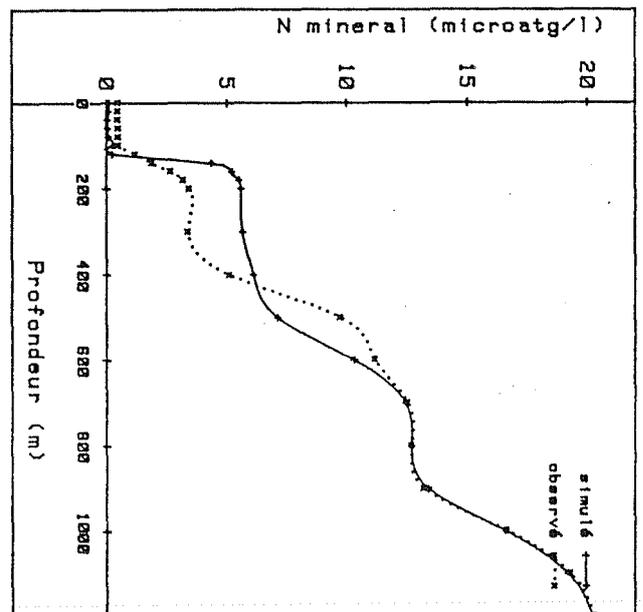
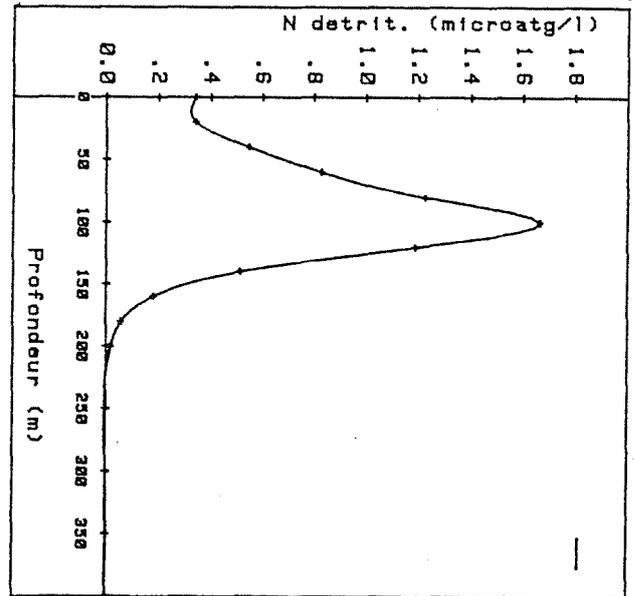


FIG. 24:

PROFIL D'EQUILIBRE
ATTANT PAR LE
SYSTEME

SIMULATION :

$V. \text{ SEDIMENTATION} = 40 \text{ cm/d}$
$K_2 = 1.78 \text{ cm}^2/\text{s}$



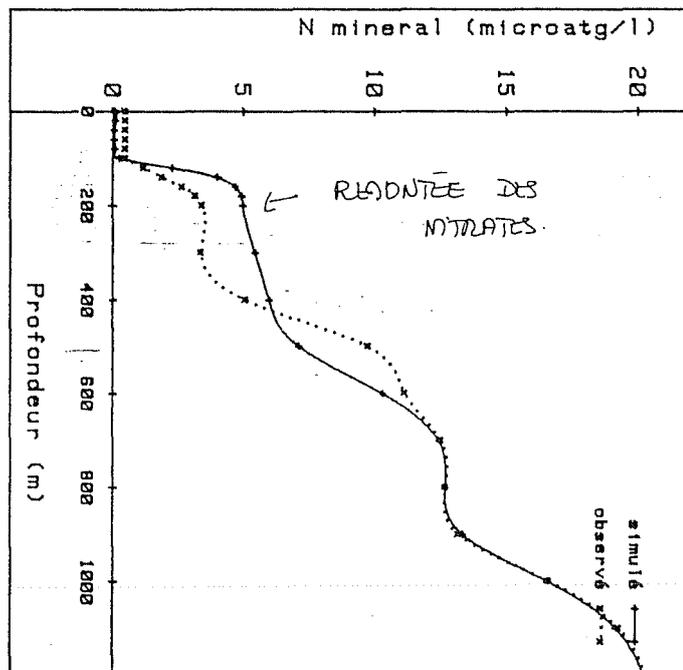
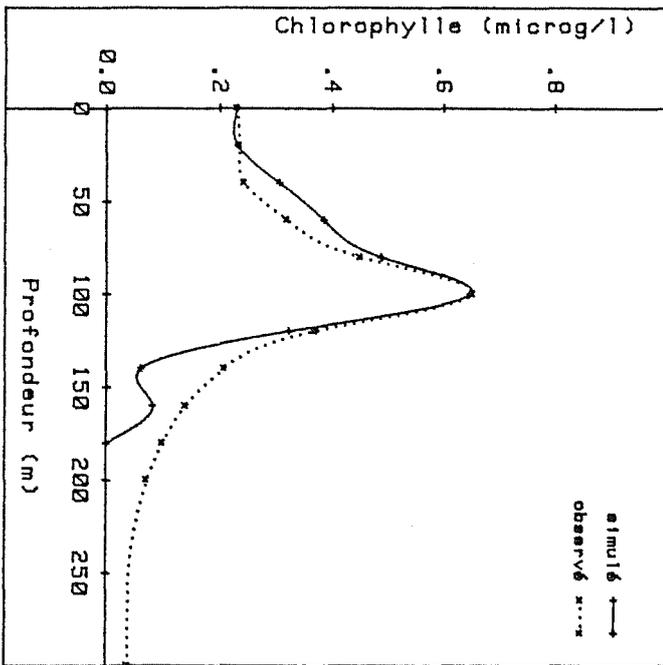
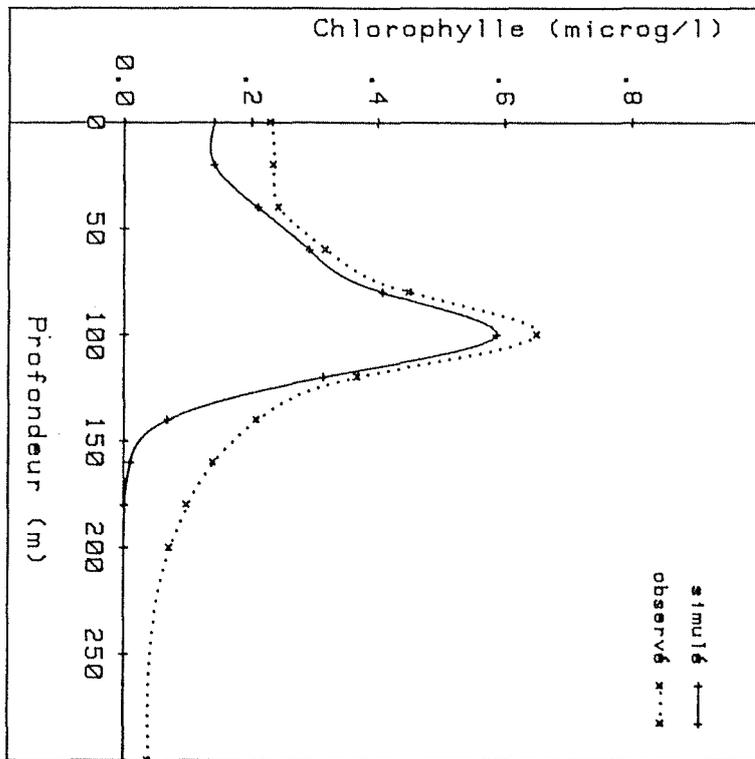


FIG 25: PROFILS D'ÉQUILIBRE
POUR DIFFÉRENTES VITESSES
DE SÉDIMENTATION

variables = JACOBIEN

D: matrice (N*M) des dérivées des variables par rapport aux paramètres

On peut donc estimer la sensibilité de la variable Xi au paramètre Pk au voisinage de l'équilibre par

$$D = - J^{-1} * R$$

La matrice D obtenue est normalisée en multipliant les $\frac{\delta X_i}{\delta P_k}$ par $\frac{P_k}{X_i}$, puis en divisant toute la matrice par l'élément Dik le plus fort en valeur absolue.

Dans le cas d'un système fermé en équilibre, la somme des équations est nulle. L'une des Fi doit donc être négligée et remplacée par l'équation de fermeture du système.

$$\sum_{\text{Boites}} \sum_N X_i \cdot V_i = \text{Masse totale d'azote dans le système.}$$

Pour cette équation :

$$\frac{dF_N}{d X_i} = \sum V_i \quad \text{et} \quad \frac{dF_N}{d P_k} = 0$$

Cet algorithme a donc été appliqué à notre système, l'équation de variation de l'azote détritique étant remplacée par la relation de fermeture.

La sensibilité a ainsi été calculée à 3 profondeurs: en surface, au niveau du maximum de chlorophylle et au fond de la zone euphotique (140-160m). (Fig 26 a,b,c).

Deux types de tableaux sont donnés pour chaque profondeur. Le premier fournit la sensibilité relative des paramètres, c.a.d. rapportée à l'élément le plus fort qui est mis à 100. le deuxième permet de juger de l'importance de la sensibilité globale de chaque variable, et des paramètres les plus déterminants. Les 21 valeurs du 1er tableau sont rangées par ordre décroissant d'importance (1 pour le plus important, 21 pour le moins

	CTE DE MICHAELIS	CROISSANCE MAX A 0°C	AUGMENTATION DES VITESSES DUE A T°	COEF. EXTINCTION LUMIERE	FLUX LUMIERE OPTIMAL	NORMALITE A 0°C	REMINERAL. DE N A 0°C.
N PHYTO	-6,15	13,1	4,1	5,2	2,4	-59,8	68
N DETRIT.	-4,2	8,9	-8,9	3,5	1,63	0,579	-14,2
N MINERAL	66,7	-99	4,6	-39,6	-18,2	100	2,01

SENSIBILITE RELATIVE AUX PARAMETRES - VALEUR ABSOLUE MAX = 1,667.

	CROISS. A 0°C.	CTE DE MICHAELIS	NORMALITE A 0°C.	REMINERAL. A 0°C.	AUGT. DES VITESSES DUE A T°.	COEFF. EXTING. LUMIERE	FLUX LUMIERE OPTIMAL	
N PHYTO	10	13	4	3	6	15	18	70
N DETRIT	11	16	21	9	12	17	20	106
N MINER	2	5	1	19	14	7	8	56
	23	24	26	31	33	39	46	

IMPORTANCE DECREISSANTE DES PARAMETRES.

FIG 26 . A .

SENSIBILITE DU SYST. AUX PARAMETRES EN SURFACE (0-20m)

	CTE DE MICHAELIS	Taux DE CROISSANCE MAX A 0°C	AUGMENT. DES VITESSES DUE A T°.	COEFF. EXTINCTION LUMIERE	FLUX LUMINEUX OPTIMAL	Taux DE MORTALITÉ A 0°C	REMINERAL. A 0°C.
N PHYTO	-0,365	4	-2,37	-9,35	-0,321	-15	9,624
N DETRIT.	-0,43.	4,8	2	-11,12.	-0,381.	-0,723	-2,94
N MINÉRAL.	3,9	-43,2	-8,3	100	3,431	42	-3,4.

SENSIBILITE ABSOLUE MAXIMALE = 6,95.

	COEFF. EXTINCTION LUMIERE	Taux DE CROISS. MAX 0°C.	Taux DE MORT. 0°C	REMINERAL A 0°C	AUGMENT. VITESSES DU A T°	CTE DE MICHAELIS	FLUX LUMINEUX OPTIMAL
N PHYTO.	7	10	4	6	15	20	21
N DETRIT.	5	9	17	14	16	18	19
N MINÉRAL.	1	2	3	13	8	11	12
	13.	21	24	33	39	49	52

83
98
50

FIG 26.B : SENSIBILITE AUX PARAMETRES AU NIVEAU DU MAXIMUM DE CHLOROPLHYLE (80-100µm)

	CTE DE MICHAELIS	TARX DE CROISSANCE MAX 0°C	AUGMENT. VITESSES TD"	COEFF. EXTING. LUMIERE	FLUX LUMINEUX OPTIMAL	TARX MORTALITE 0°C	REMINERAL. A 0°C.
N PHYTO.	$-8 \cdot 10^{-3}$	21,6	-86,8	-100	-0,355	-74	$-1,9 \times 10^{-2}$
N DETRIT.	$-2,1 \times 10^{-3}$	5,35	-86,9	-26,8	-8,81	-5,35	-52,4
N MINER.	9×10^{-5}	-0,226	3,03	1	$3,7 \times 10^{-3}$	0,353	1,7.

SENSIBILITE MAXIMALE ABSOLUE = 1,9

	AUGMENT. VITESSES TD"	COEFF. EXTING. LUMIERE	TARX MORTALITE A 0°C.	CROISS. MAX. A 0°C.	REMINER. A 0°C.	FLUX LUMINEUX OPTIMAL	CTE DE MICHAELIS	
N PHYTO	3	1	4	7	17	13	18	66
N DETRIT.	2	6	9	8	5	16	20	66
N MINERAL	10	12	14	15	11	9	21	102
	15	19	27	30	33	48	59	

FIG 26. C : SENSIBILITE AUX PARAMETRES AU FOND DE LA ZONE EUPHOTIQUE (100-160m)

important) et le tableau est construit de façon à remarquer les paramètres les plus importants à gauche (somme la plus faible) et les moins importants à droite.

Résultats

En surface, les variables sont sensibles au taux de croissance phytoplanctonique, au coefficient de mortalité et à la constante de Michaelis, c.a.d. des facteurs ayant un rapport avec l'azote minéral (hormis le coefficient de mortalité). Les nitrates sont plus touchés du fait de leurs faible concentration. Par contre les paramètres concernant les variables forçantes restent "muets". Température et lumière sont forts en surface.

Au niveau du maximum de chlorophylle, la lumière joue un rôle important avec le coefficient d'extinction de la lumière. Le taux de croissance phytoplanctonique est important, sensible à la lumière à cette profondeur. C'est encore l'azote minéral qui est le plus affecté par la variabilité des paramètres.

Lorsqu'on passe en profondeur, les sensibilités changent car l'environnement n'est plus le même. Il est très limitant.

La température exerce sa pression par l'intermédiaire du coefficient de variation des vitesses. Le phytoplancton est très sensible au coefficient d'extinction de la lumière qui est très atténuée à cette profondeur. Les variables forçantes néfastes au développement sont très limitantes. C'est le phytoplancton qui est cette fois le plus sensible.

Il est à noter qu'on retrouve le coefficient de mortalité à chaque profondeur. Or il résume à lui seul tous les niveaux trophiques supérieurs, celui du zooplancton en particulier. Il reflète évidemment assez mal les relations du phytoplancton avec les autres niveaux et devrait donc être remplacé.

Il est intéressant de voir les variations de sensibilité selon l'environnement dans lequel se trouve le système. Les facteurs qui conditionnent son comportement sont bien mis en évidence.

$$\left[\begin{array}{l} \cdot F_1 = d[\text{PHYTOPLANCTON}] / dt \\ \cdot F_2 : [\text{PHYTOPLANCTON}] + [\text{N DETRIQUE}] + [\text{N MINERAL}] = \text{CTE} \\ \cdot F_3 = d[\text{N MINERAL}] / dt. \end{array} \right.$$

1°) CALCUL DU JACOBIEN . J

• $\partial F_1 / \partial [\text{PHYTO}] = \text{CROISSANCE} - \text{MORTALITE}$

• $\partial F_2 / \partial [\text{PHYTO}] = 1$

• $\partial F_3 / \partial [\text{PHYTO}] = - \text{CROISSANCE}$

• $\partial F_1 / \partial [\text{N DETRIT}] = 0$

• $\partial F_2 / \partial [\text{N DETRIT}] = 1$

• $\partial F_3 / \partial [\text{N DETRIT}] = \text{REMINERAL}$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot \partial F_1 / \partial [\text{N MINER.}] = \frac{G_{\text{max}} \cdot \text{FACTUM} \cdot [\text{PHYTO}] \cdot K_N}{([\text{N MINERAL}] + K_N)^2} \\ \cdot \partial F_2 / \partial [\text{N MINER.}] = 1 \\ \cdot \partial F_3 / \partial [\text{N MINER.}] = - \partial F_1 / \partial [\text{N MINER.}] \end{array} \right.$$

2°) CALCUL DE R . DERIVÉES PAR RAPPORT AUX PARAMÈTRES.

① -> CONSTANTE DE MICHAELIS (KN)

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot DF_1 = G_{\text{max}} \cdot \text{FACTUM} \cdot \frac{[\text{PHYTO}]}{([\text{N MINERAL}] + K_N)^2} \\ \cdot DF_2 = 0 \\ \cdot DF_3 = - DF_1 \end{array} \right.$$

② → TAUX DE CROISSANCE MAXIMALE A 0°C. ($G_{max\ 0^\circ C}$).

$$\left\{ \begin{array}{l} \cdot \partial F_1 = e^{\alpha T} \cdot \text{FACT}_{LUN} \cdot \text{FACT}_{NUT} \cdot [N_{PHYTO}] \\ \cdot \partial F_2 = 0 \\ \cdot \partial F_3 = -\partial F_1 \end{array} \right.$$

③ → TAUX D'AUGMENTATION DES VITESSES DU A LA TEMPERATURE (α)

$$\cdot \partial F_1 = \left[(G_{max\ 0^\circ C} \cdot \text{FACT}_{LUN} \cdot \text{FACT}_{NUT} - \text{MORP}\ 0^\circ C) \right] \cdot [N_{PHYTO}] \cdot T.$$

$$\cdot \partial F_2 = 0$$

$$\cdot \partial F_3 = \left[\text{RESIN}\ 0^\circ C \cdot [N_{DETUIT}] - (G_{max\ 0^\circ C} \cdot \text{FACT}_{LUN} \cdot \text{FACT}_{NUT} \cdot [N_{PHYTO}]) \right] \cdot T \cdot e^{\alpha T}$$

④ → COEFFICIENT D'EXTINCTION DE LA LUMIERE (K)

$$\cdot \partial F_1 = - \frac{G_{max} \cdot e \cdot \text{FACT}_{NUT} \cdot [N_{PHYTO}]}{K_2 \cdot \text{PREF}} \cdot \left(e^{\left(\frac{-I_0}{I_{opt}} \cdot e^{-K(z+P_{zfp})} \right)} - e^{\left(\frac{-I_0}{I_{opt}} \cdot e^{-Kz} \right)} \right)$$

$$+ \frac{G_{max} \cdot e \cdot \text{FACT}_{NUT} \cdot [N_{PHYTO}]}{K \cdot \text{PREF}} \cdot \left(\frac{I_0}{I_{opt}} \right) \left[z \cdot e^{-Kz} \cdot e^{-\frac{I_0}{I_{opt}} \cdot e^{-Kz}} - (z+P_{zfp}) \cdot e^{-K(z+P_{zfp})} \cdot e^{-\frac{I_0}{I_{opt}} \cdot e^{-K(z+P_{zfp})}} \right]$$

$$\cdot \partial F_2 = 0$$

$$\cdot \partial F_3 = -\partial F_1$$

⑤ → FLUX WINNEER OPTIMAL (I_{opt})

• $\partial F_1 = G_{\max} \cdot \frac{e}{\text{Prf} \cdot K} \cdot \text{FACT. [N PHTO]} *$

$\left[e^{-\frac{I_0}{I_{opt}}} \cdot e^{-K(z+\text{Prf})} \cdot \frac{I_0 \cdot e^{-K(z+\text{Prf})}}{(I_{opt})^2} - e^{-\frac{(-I_0 \cdot e^{-Kz})}{I_{opt}}} \cdot \frac{I_0 \cdot e^{-Kz}}{(I_{opt})^2} \right]$

• $\partial F_2 = 0$

• $\partial F_3 = -\partial F_1$

⑥ → COEFFICIENT DE MORTALITE A 0°C (MORP 0°C)

• $\partial F_1 = -e^{\alpha T} \cdot [\text{N PHTO}]$

• $\partial F_2 = 0$

• $\partial F_3 = 0$

⑦ → TAUX DE REMINERALISATION DE L'AZOTE ORGANIQUE A 0°C (RBN 0°C)

$\left\{ \begin{array}{l} \cdot \partial F_1 = 0 \\ \cdot \partial F_2 = 0 \\ \cdot \partial F_3 = e^{\alpha T} \cdot [\text{N DETRIT}] \end{array} \right.$

Conclusion

Cette étude permet de discerner la part du rôle joué par les facteurs physiques et biologiques sur ce système un peu particulier. En particulier on peut voir que la diffusion turbulente est très importante puisqu'elle renforce la croissance planctonique par apport de nourriture.

Une connaissance plus précise de la dynamique des masses d'eau et des valeurs de sédimentation est donc nécessaire.

L'étude de sensibilité rend bien compte du comportement du phytoplancton soumis à des contraintes environnementales différentes selon la profondeur où il se trouve.

D'autre part le modèle peut être amélioré:

- introduction d'une sédimentation variable sur la . profondeur pour le phytoplancton.
- variation du rapport N / Chla avec la profondeur.
- sédimentation propre à l'azote détritique.
- mortalité fonction de la quantité de nourriture.
- prise en compte des ondes internes
- introduction du niveau zooplanctonique. Une tentative a été faite, mais n'a pas donné de résultats satisfaisants, les relations phytoplancton/zooplancton étant difficiles à appréhender. De plus les données de terrain concernant les biomasses de zooplancton étaient insuffisantes.
- amélioration des profils de nitrates trop faibles dans notre cas.

II - MODELISATION DU REJET D'EAU ET DE SON IMPACT

Différents schémas de rejet des eaux utilisées par la centrale ont été proposés, côté mer ou côté lagon, en eaux mélangées ou séparées. Dans ce dernier cas, l'impact risque d'être minime car l'eau froide s'écoulera sur le fond jusqu'à une profondeur d'isodensité, probablement en dessous de la zone euphotique. La modélisation va porter sur le cas d'un rejet d'eaux mélangées côté mer, le lagon n'ayant pas été étudié dans la première partie.

Le tuyau posé à 50 m de fond (Fig. 28) rejette horizontalement une eau de forte densité ($\sigma_t=23$, $T^\circ=21^\circ\text{C}$) dans un milieu moins dense (22,5). Le débit de rejet est de 25 m³/s. La masse d'eau ainsi rejetée forme un panache dont la forme dépend de la physique ambiante, en particulier du profil de densité (Fig. 27) et des courants (essentiellement le balancement des marées à Tahiti).

A - DESCRIPTION DU PANACHE

Il se caractérise par 3 zones:

- Le champ proche où les effets de jet et de densité sont prépondérants, et inclut le champ de gravité dans lequel l'eau s'enfonce par son propre poids. Au cours de ce trajet, le panache subit un mélange dû à la différence de vitesse entre le jet et l'eau ambiante, mélange qui réduit les différences de vitesse et de densité, et dilue les constituants de l'effluent.

Il atteint assez rapidement une profondeur d'isodensité où la différence de vitesse avec le milieu ambiant est très faible.

- Le champ intermédiaire. Parvenu à sa profondeur d'équilibre, l'effluent dilué forme une couche mince intermédiaire à laquelle les mouvements ambiants imposent un transport passif qui élargit le panache et disperse les constituants.

- Le champ lointain. L'effluent est entraîné par l'eau

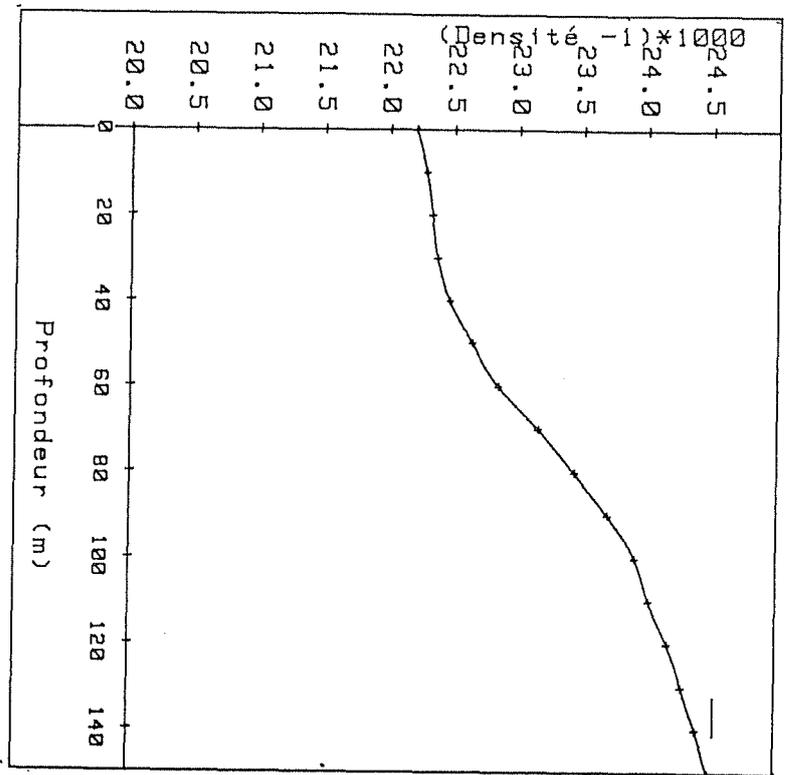


FIG. 27. VARIATIONS VERTICALES DE LA DENSITÉ

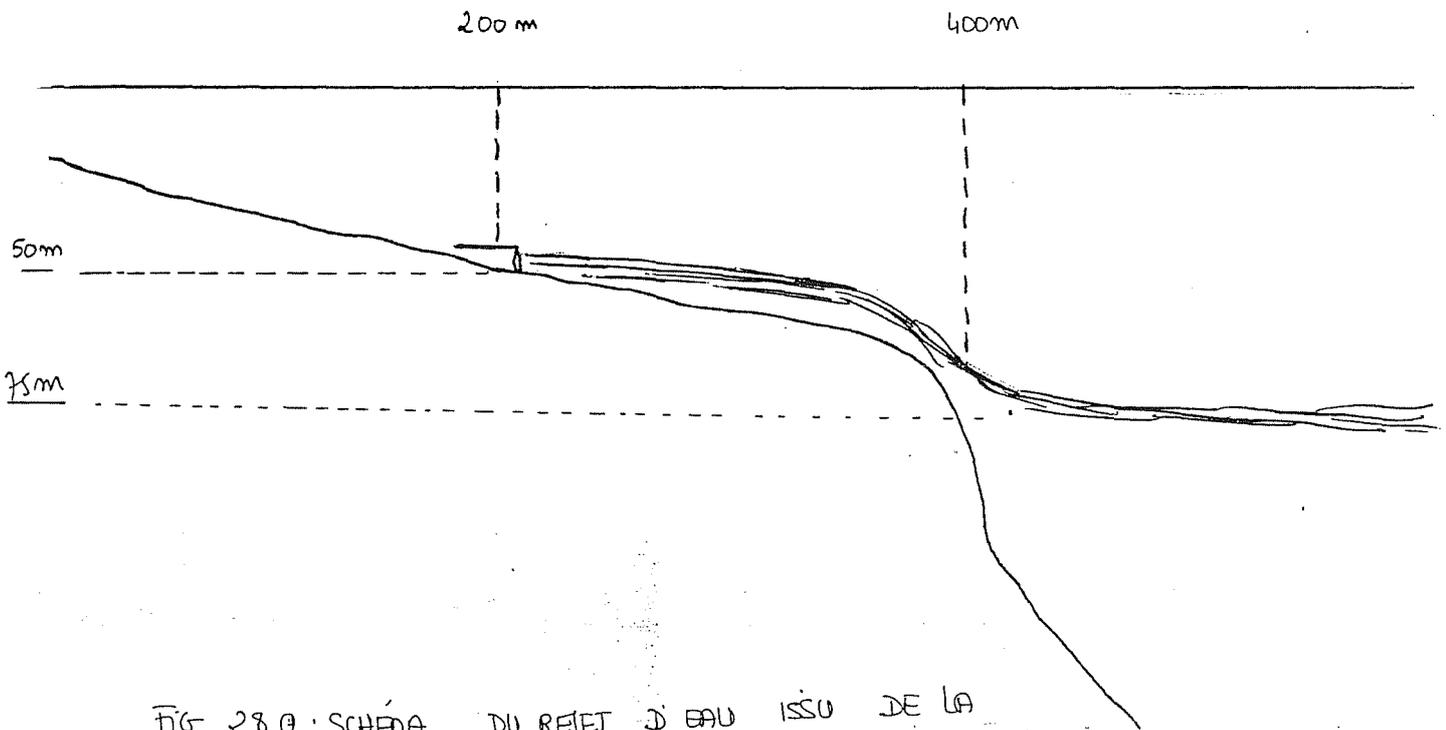


FIG 28 a : SCHEMA DU REJET D'EAU ISSU DE LA CENTRALE - ECOULEMENT DE CE REJET.

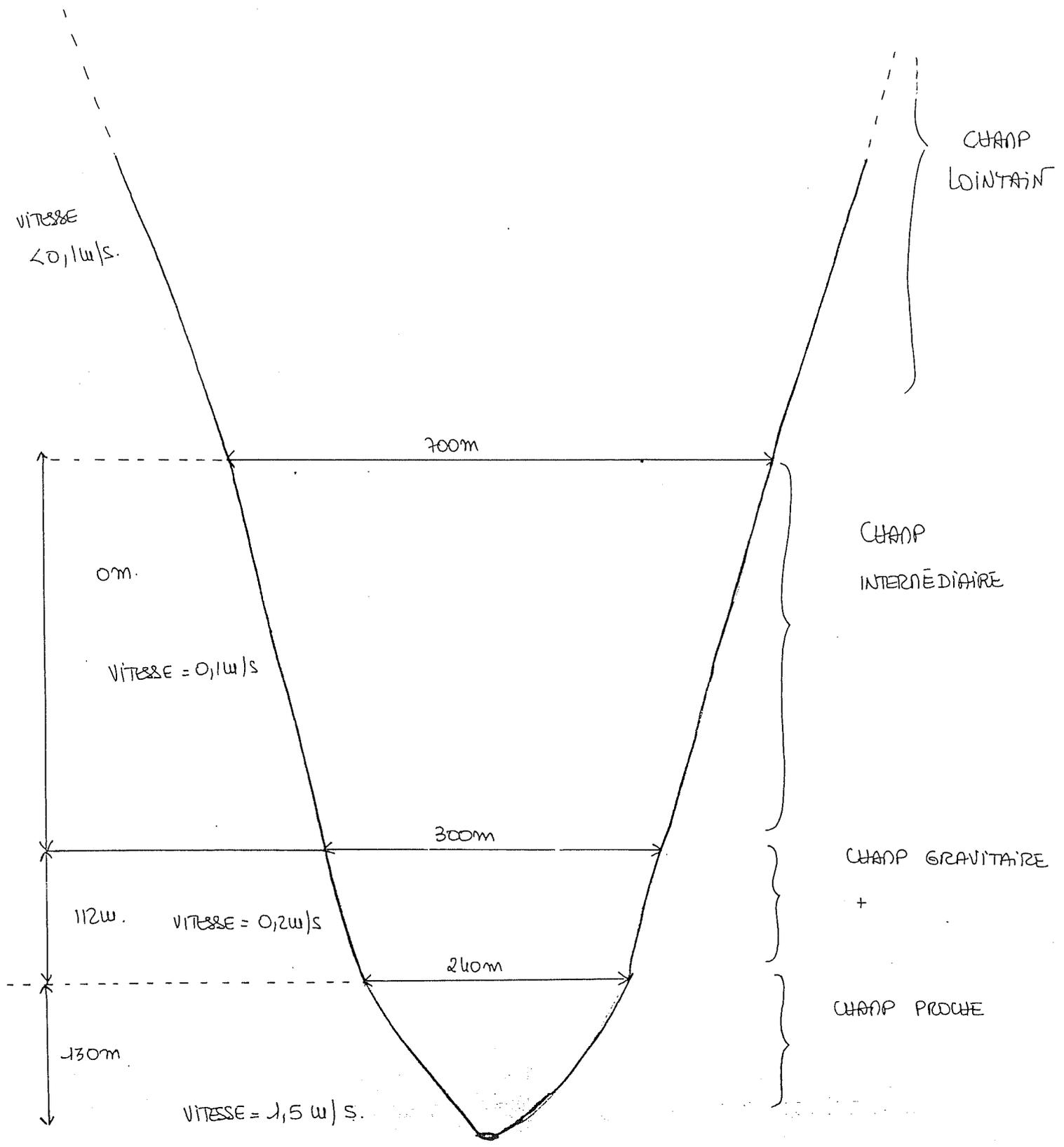


FIG 28.b : ÉTENDUE DU PANACHE D'EAU REJETÉE. VUE DE DESSUS.

00

environnante. l'étalement et la diffusion deviennent assez faibles. La diffusion turbulente régit la dispersion.

Des méthodes de calcul basées sur des expérimentations (Paddock et Ditmars, 1983) permettent d'estimer l'évolution d'un constituant et la forme de l'effluent. La figure dessine donc la configuration possible du panache d'eau face au site E.T.M. Rejetée dans une masse d'eau homogène en densité, l'eau s'étale rapidement en conservant une trajectoire horizontale. Ce n'est que lorsque sa vitesse se réduit fortement qu'il s'enfonce de par son propre poids jusqu'à une profondeur de 60m où il est freiné par le gradient de densité. Il trouve alors sa profondeur d'équilibre vers 73 m. Il a déjà parcouru 240 m. A partir de cette distance il s'en va progressivement vers le large en constituant une veine d'eau qui s'élargit peu.

Au cours de ce trajet, ses constituants subissent une dilution très forte dans le champ proche ($d=3.5$) mais qui est très lente par la suite. Le suivi d'un traceur conservatif contenu dans le rejet montrerait que le panache est visible jusqu'à plusieurs Km de distance de la côte.

Dans ce cas précis le rejet contient essentiellement des nitrates et leur concentration est nettement supérieure à celle du milieu ambiant (6 microatg/l contre 0.1-0.5).

On a donc cherché à modéliser la dynamique de ce panache et voir si elle peut conduire à un enrichissement du milieu en phytoplancton.

B - LE MODELE EN BOITES

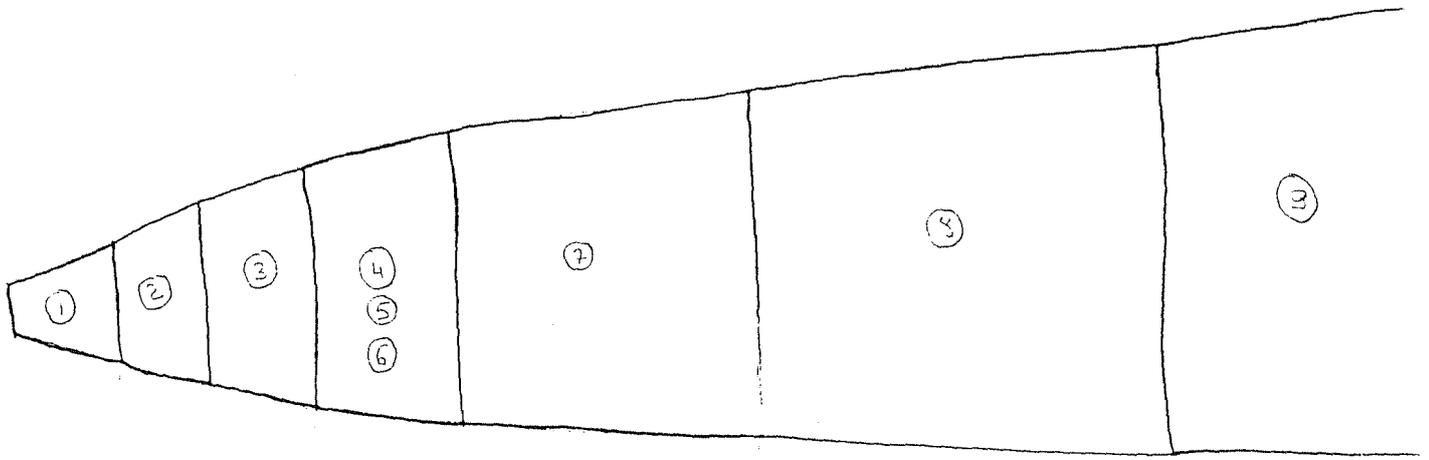
Sur la figure 29 est représenté le modèle en boîtes qui a été construit. La diffusion verticale nous a semblé négligeable dans le champ proche par rapport aux mouvements horizontaux. Aussi cette zone n'est pas entourée de boîtes. Par contre les échanges verticaux seront sans doute importants dans la zone éloignée. Les mouvements d'eau au sein d'une boîte sont simulés sous forme de "rejet" (entrée d'eau dans une boîte), de "prise" (sortie) et

COMPT. TROUSSE

GEANTIERE

INTERMEDIARE

BOITIER



127m

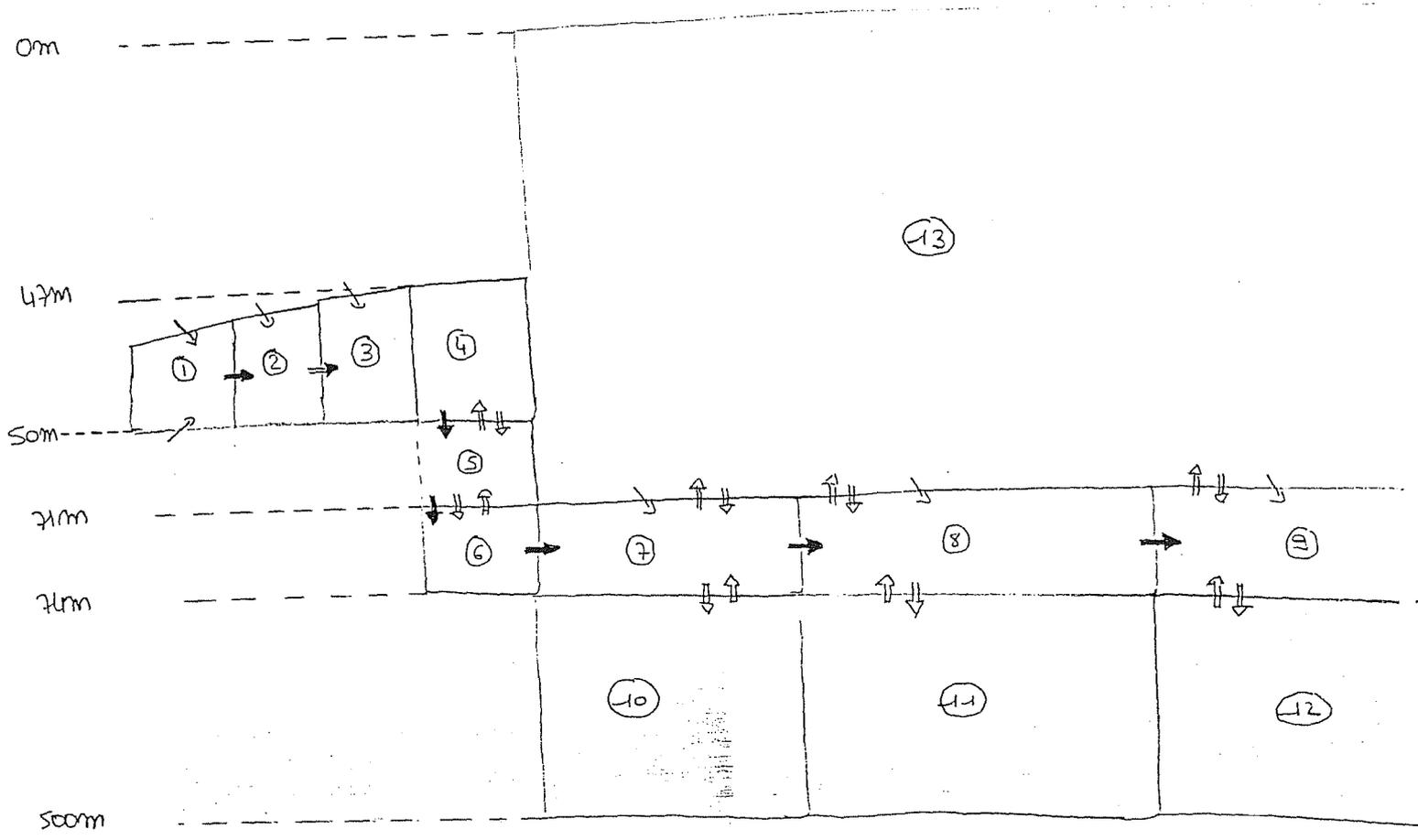
36

130m

200m

660m

FIG 29.A: SYSTEME DE BOITES - VUE DE DESSUS.



↘ : Entrées d'eau = RAGE
 ↑↑ : DIFFUSION TURBULENTE

→ DEPLACEMENT DU PANACHE
 PASSAGE D'EAU D'UNE BOITE A L'AUTRE = DERIVE

FIG 29.B: VUE LATÉRALE DU SYSTEME DE BOITES.

de "dérive" (passage d'eau d'une boîte dans une autre. Ainsi, la dilution est-elle entendue comme une entrée d'eau dans le panache.

C - RESULTATS DE LA SIMULATION

Le système se stabilise en moins de 3 jours. Les concentrations à l'intérieur de chaque boîte sont indiquées sur la figure 30 pour chaque variable.

L'interprétation de tels résultats est difficile à faire. Par manque de temps, il n'a pas été possible d'approfondir le problème. Le modèle est très grossier. Le maximum de chlorophylle n'y est pas représenté. Or il est certain que des échanges doivent avoir lieu avec le panache qui se trouve juste au dessus (en supposant notre estimation vraie). Les temps de résidence à l'intérieur de chaque boîte sont très variables, rendant la simulation délicate.

Cependant, les résultats ne sont pas totalement irréalistes. Le champ proche est relativement dépouillé de phytoplancton, fait que l'on pourrait attribuer aux débits importants qui chassent rapidement l'eau, ne laissant pas au plancton le temps de se développer. De ce fait, l'azote minéral serait abondant puisqu'il n'est pas consommé.

Par contre, dans les champs intermédiaire et lointain, on observe une augmentation sensible de phytoplancton (* 2) qui serait due à la présence d'azote minéral en concentration plus forte que la normale (de l'ordre de 1 microatg/l d'après les données de dilution).

Cette analyse n'a rien de sûr et il ne nous est pas permis à ce stade d'en conclure quoi que ce soit sur l'impact éventuel .

0,0093	0,0114	0,01257	0,01282	0,2	
			0,0143		
			0,016		
			0,921	0,786	0,438
			0,0047	0,0065	0,00661

↑ FIG 30. (a) - TENEURS EN CHLOROPHYLLE (microg/lp)

0,039	0,047	0,053	0,053	0,647	
			0,053		
			0,065		
			2,918	2,349	1,2
			0,0169	0,0166	0,016

↑ FIG 30. (b) - TENEURS EN AZOTE DETRITIQUE (MICROG/lp)

0,2119	0,17	0,1377	0,11375	0,019	
			0,1355		
			0,107		
			0,074	0,039	0,049
			5	5	5

↑ FIG 30. C - TENEURS EN AZOTE MINERAL (MICROG/lp)

CONCLUSION GENERALE

La modélisation simple de l'écosystème planctonique tropical a permis de comprendre certains mécanismes de sa structure de fonctionnement.

Bien que freinée en surface par une carence en azote minéral, la croissance phytoplanctonique est favorisée vers 80-100 m de profondeur. Le système biologique seul explique le caractère oligotrophe à ces latitudes.

La diffusion verticale spécifique du site et la sédimentation jouent un rôle essentiel dans la dynamique du système. Leur action conjointe renforce le pic de chlorophylle par apport de nourriture en provenance du fond riche en nitrates.

Il serait cependant intéressant de mieux rendre compte du compromis effectué par le plancton entre les besoins en lumière et en nourriture. De plus, la prise en compte du zooplancton faisant intervenir grazing, respirzation et excrétion apporterait une meilleure connaissance de l'azote détritique en particulier.

Les résultats concernant l'impact de la centrale doivent être considérés avec beaucoup de réserve. Le cas d'un rejet dense à la surface d'une masse d'eau stratifiée a été rarement abordé auparavant et l'estimation de la forme du panache est très approximative. De plus, elle découle d'hypothèses qui sont rarement vérifiées dans la nature. Cette approche révèle donc la nécessité d'une étude physique plus précise du panache.

Il importerait également d'aborder l'étude du lagon et le cas d'un rejet de ce côté-ci.

Cet travail, s'il n'a rien de définitif permet cependant d'orienter les recherches vers une étude plus poussée du rôle des phénomènes physiques sur le comportement biologique, et met en évidence le besoin d'une étude plus solide du problème de la dispersion d'un rejet dense en mer stratifiée.

BIBLIOGRAPHIE

- BIENFANG P.K. (1985) - "Size Structure and Sinking Rates of Various Microparticulaire Constituents in Oligotrophic Hawaiian Waters ".
Mar. Ecol. Prog. Ser., Vol. 23, p.143-151.
- BIENFANG P.K et SZYPER J.P (1984) - " Temporal variability of phytoplankton in a subtropical ecosystem"
Limnol. Oceanogr. 29(3), 527-539.
- CHARPY L. et TEURI J. - "Evolutions des pigments phytoplanc-
toniques à la station côtière de la digue Nord-Est
de Papeete en 1983 et 1984 ".
Centre O.R.S.T.O.M. de Tahiti - Archives d'Océanographie
N° 85-12.
- DE NARDI J.L, RAYMOND A., RICARD M. (1983) - "Etude des
conséquences pour le lagon de TAUNOA des travaux
d'extension du port de Papeete. Etude descriptive
du site actuel".
Rapport C.E.A. - R - 5222 ,1983 C.E.N de Fontenay
aux Roses.
- EPPLEY R.W, RENGER E.H, VENRICK E.L, MULLIN M.M (1973) -
"A Study of Plankton Dynamics and Nutrient Cycling
in the Central Gyre of the north Pacific Ocean ".
Limnol. and Oceanogr., Vol. 18(4), p. 534-551
- EPPLEY R.W, RENGER E.H, HARRISON W.G (1979) - "Nitrate and
Phytoplankton Production in Southern California
Coastal Waters ".
Limnol. Oceanogr., 24(2), p. 483-494.

GUNDERSEN K.R, CORBIN J.S et Al (1976) - "Structure and Biological Dynamics of the Oligotrophic Ocean Photic zone off the Hawaiian Islands ". Pacific Science (1976), Vol 30, N°1, p.45-68.

JAMART B.M, WINTER D.F et Al (1977) - " A Theoretical Study of Phytoplankton Growth and Nutrient Distribution in the Pacific Ocean off the Northwestern U.S. Coast ". Deep Sea Research , Vol. 24, p. 753-773.

JAMART B.M, WINTER D.F, BARSE K. (1979) - "Sensitivity Analysis of a Mathematical Model of Phytoplankton Growth and Nutrient Distribution in the Pacific ocean off the Northwestern U.S. Coast ". Journal of Plankton Research, Vol. 1, N°3, p.267-290.

KESSLER M., MONBET Y. (1984) - "Projet E.T.M. - Résultats des études de site ". SDT/COB. I.F.R.E.M.E.R. ,Brest.

KREMER J.N and NIXON S.W (1978) - "A Coastal Marine Ecosystem - Simulation and Analysis ". Biological Studies 24, Springer Verlag Berlin Heidelberg N.Y.

LEPETIT J.P (1979) - "Dispersion en mer. Modèle simple en cellules ". Rapport E.D.F. E 42 / 79.33.

MARCHAND P.. (1979) - "L'énergie thermique des mers ". La Recherche N°105, Nov. 79, p.1078-1089.

MASSART G. (1983) - "E.T.M. Le renouveau " Mini séminaire ETM, 28 Sept. 1983, Brest France.

O'BRIEN J. , WROBLEWSKI J.S (1976) - "A simulation of the Mesoscale Distribution of the Lower Marine Trophic Levels off West Florida ".

In PATTEN B.C (1976) - "Systems Analysis and Simulation in Ecology ". Volume IV, Academic Press .

O.T.E.C. (1982) - "Environmental Effects Assessment Program Plan" U.S. Department of Commerce.

National Oceanic and Atmospheric Administration Office of Ocean Minerals and Energy .

OUDOT C. (1978) - " Distribution de différentes formes de matière organique particulaire dans le Pacifique tropical Occidental ".

Cahiers de l'O.R.S.T.O.M - Série Océanographie Vol. 16 (2) , p.179-189.

PADDOCK R.A , DITMARS J.D (1983) - "Initial Screening of License Applications for O.T.E.C. Plants with Regard to their Interaction with the Environment ".

ANL/OTEC - EV - 2 Argonne National Laboratory - University of Chicago, U.S. Department of Energy.

du PENHOAT Y. (1979) - "Modèle numérique de l'évolution de la thermocline . Application à la prévision. "

N°535 EPSHOM / E / OC.

RICARD M. (1986) - " Projet E.T.M. - Résultats des études de site Biologie :phytoplancton, zooplancton, biosalissures ".

Rapport de fin d'étude, Contrat CNEXO 83/7312

Naturalia et Biologia , Museum National d'Histoire Naturelle.

- RICARD M. , DELESALLE B. (1982) - "Approche d'un effet de masse insulaire en Polynésie Française : phytoplancton des eaux côtières de Tahiti ".
Oceanis, Vol. 8, Fasc.4, p. 309-318.
- ROUGERIE F. (1984)- " Le milieu lagonaire en Polynésie Française"
in "Les écosystèmes lagunaires de Polynésie Française -
Etat des connaissances "
VI Contributions -C.O.R.D.E.T.
- ROUGERIE F., VIENNEY P.J, MAREC L. (1985) - "Les eaux côtières
Nord de Tahiti et leur contexte hydroclimatique ".
O.R.S.T.O.M. - ISSN - 0755 - 3412
Oceanographie - Notes et Documents N°26
- THOMANN R.V. (1974) - "Preliminary Model of Potomac Estuary
Phytoplankton ".
Journal of the Environmental Engineering Division, EE3, 10576
- VENRICK E.L., Mc GOWAN J.A., MANTYLA A.W. (1973) -
"Deep Maxima of Photosynthetic Chlorophyll in the
Pacific Ocean "
Fishery Bulletin, Vol. 71, N°1, p.41-52.
- VINOGRADOV M.E., KRAPIVIN V.F., MENSCHUTKIN V.V. (1973) -
"Un modèle mathématique de fonctionnement d'un
écosystème pélagique dans un océan tropical
(appliqué aux données de la campagne 50 du
"Vityaz") ".
Oceanologie, XIII, N°5, p 852-866

685

WALSH J.J (1971) - "Simulation of Trophic Interaction in an
Upwelling Ecosystem".

in Proc. Summer Computer Simul. Conf. - Boston - 19/21 Juil.-

WROBLEWSKI J.S. (1977) - "A model of Phytoplankton Plume
Formation during variable Oregon Upwelling "
Journal of Marine Research, 35(2), p.357-394.

