

**AVANT PROJET - TAHITI
CENTRALE E.T.M. 5 MW**

PACIFIQUE SUD - POLYNÉSIE FRANÇAISE
TAHITI
Extrait des feuilles 2 et 3 de la carte
DE TAAPUNA A LA POINTE VENUS

**ÉTUDE
DES IMPACTS SUR
L'ENVIRONNEMENT**

IFREMER Bibliothèque de BREST



OEL08206



IFREMER

Centre de BREST

DIRECTION DE L'INGÉNÉRIE ET DE LA TECHNOLOGIE

AVANT PROJET - TAHITI CENTRALE E.T.M. 5 MW

ÉTUDE DES IMPACTS SUR L'ENVIRONNEMENT

**Yves MONBET
DIRECTION ENVIRONNEMENT
ET RECHERCHES OCÉANIQUES
ENVIRONNEMENT LITTORAL**

DÉCEMBRE 1987

REMERCIEMENTS

Je remercie chaleureusement les personnes qui ont collaboré à cette étude :

- MM. ROUGERIE F. et B. WAUTHY - antenne ORSTOM de Tahiti.

- MM. SALVAT B., M. RICARD et B. DELESALLE - antenne du Muséum/EPHE de Tahiti.

- M. MENESGUEN A. - IFREMER/Brest.

- Les équipages des navires océanographiques Tainui, Marara et Coriolis.

S O M M A I R E

INTRODUCTION	1
PRESENTATION DU SITE	4
LE PROJET	6
1. Objectifs du projet	6
2. Description sommaire du projet	6
2.1. Généralités	6
3. Description détaillée des ouvrages de prise et rejet d'eau	9
3.1. Solution n° 1	9
3.2. Variantes du projet	16
PRESENTATION DE L'ETAT INITIAL DU SITE ET DE SON ENVIRONNEMENT	18
ANALYSE DE L'ETAT INITIAL	
1. Caractéristiques climatologiques	18
1.1. La température de l'air	18
1.2. Humidité relative	18
1.3. Nébulosité	20
1.4. Insolation	20
1.5. Précipitations	20
1.6. Rayonnement journalier moyen	20
1.7. Vents	20
2. Caractéristiques géomorphologiques et bathymétriques	23
2.1. Généralités	23
2.2. L'environnement lagunaire	24
2.3. La pente externe	26
3. Caractéristiques hydrodynamiques	31
3.1. La houle	31
3.2. Les courants et la circulation des eaux	37
4. Caractéristiques hydrologiques	58
4.1. Température de l'eau	58
4.2. Salinité	69
4.3. Densité de l'eau de mer	71
5. Caractéristiques hydrobiologiques	74
5.1. Le lagon	74
5.2. Les abords extérieurs du site	77
ANALYSE DES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT MARIN	113
1. Généralités	113
2. Effets liés à la construction des ouvrages de prise	113
et rejet d'eau	
2.1. Effets des dragages et excavations nécessaires à	114
l'ensouillage des conduites	

3. Effets des produits destinés à limiter le fouling	121
3.1. Réaction avec l'eau de mer	121
3.2. Dégradabilité	122
3.3. Toxicité du chlore	123
3.4. Taux de rejet	123
4. Fuites éventuelles du fluide de travail (cycle fermé)	124
5. Rejets de métaux traces	124
5.1. Les métaux traces et la corrosion	125
5.2. Teneurs en métaux dans l'eau sur le site de Tahiti	126
5.3. Effets potentiels du rejet d'éléments métalliques	128
dans l'eau	
6. Entraînement des organismes dans les circuits de la centrale ..	129
6.1. Généralités	129
6.2. Evaluation des impacts	130
7. Redistribution des masses d'eau	132
7.1. Comportement du panache de rejet	133
7.2. Modélisation des effets du rejet E.T.M. sur le	146
phytoplancton marin (A. MENESGUEN)	
7.3. Effets du rejet d'eaux froides sur les coraux	166
CONCLUSIONS	168
BIBLIOGRAPHIE	170
ANNEXE - LOCALISATION DES LIGNES DE MOUILLAGE DES COURANTOMETRES	176

INTRODUCTION

Les océans qui couvrent les deux tiers de la planète sont susceptibles d'offrir deux types d'énergie. D'une part des énergies utilisables à faible niveau de puissance et capables d'apporter une solution pratique à certains problèmes particuliers : ce sont essentiellement les énergies de la houle et du vent. D'autre part, une énergie qui ne se révèle intéressante qu'à partir d'un certain niveau de puissance : c'est l'énergie thermique des mers (E.T.M.) encore appelée énergie maréthermique (l'énergie marémotrice qui relève de ce dernier type est un cas assez particulier car elle ne concerne qu'un nombre de sites très restreint).

Les énergies de la mer sont un sous produit direct de l'énergie solaire ; en effet, en raison de la valeur du flux d'énergie solaire, le globe terrestre intercepte une puissance équivalente à 200 milliards de mégawatts, mais en raison de la réflexion diffuse sur l'atmosphère, sur les nuages, sur la mer et sur la terre, près de la moitié de cette énergie incidente est renvoyée vers l'espace. La plus grande partie du rayonnement solaire converti en chaleur sert à chauffer la mer qui, du fait de son faible coefficient de réflexion, absorbe une quantité importante de lumière. Comme la chaleur spécifique de l'eau est très grande, et que le volume d'eau échauffée est important, les couches superficielles de l'océan vont jouer le rôle d'un immense réservoir de chaleur.

On sait par ailleurs que les eaux profondes des océans, qui prennent naissance dans la région des pôles, s'écoulent lentement sur le fond des bassins océaniques et que leur température est voisine de 0°.

Il est donc théoriquement possible, en utilisant les différences de température qui existent entre les eaux de surface et celles du fond, de concevoir une machine thermique capable de fournir de l'énergie mécanique transformée en énergie électrique. Il s'agit là d'une technologie douce qui constitue certainement un progrès par rapport aux technologies dures et brutales mises en oeuvre jusqu'à présent.

Cependant, la faible différence de température existant entre les eaux de surface et celles du fond (de l'ordre de 20 à 25°) nécessite l'utilisation d'importants volumes d'eau chaude et d'eau froide. A titre d'exemple, pour produire 100 MWe, soit environ le dixième de la puissance d'une tranche de centrale nucléaire, il faudra utiliser environ 400 m³/s d'eau pour chacune des sources froides et chaudes qui seront ensuite rejetées à proximité de la surface de l'océan.

On peut donc s'attendre à ce qu'un tel projet soit à l'origine de modifications significatives de différents paramètres de l'environnement marin, et l'objet de la présente étude consistera donc à identifier et à évaluer les impacts découlant de la construction et de la mise en oeuvre du projet.

Seront examinés :

- l'état initial du site avant la mise en place du projet,
- l'intérêt écologique de la zone affectée.

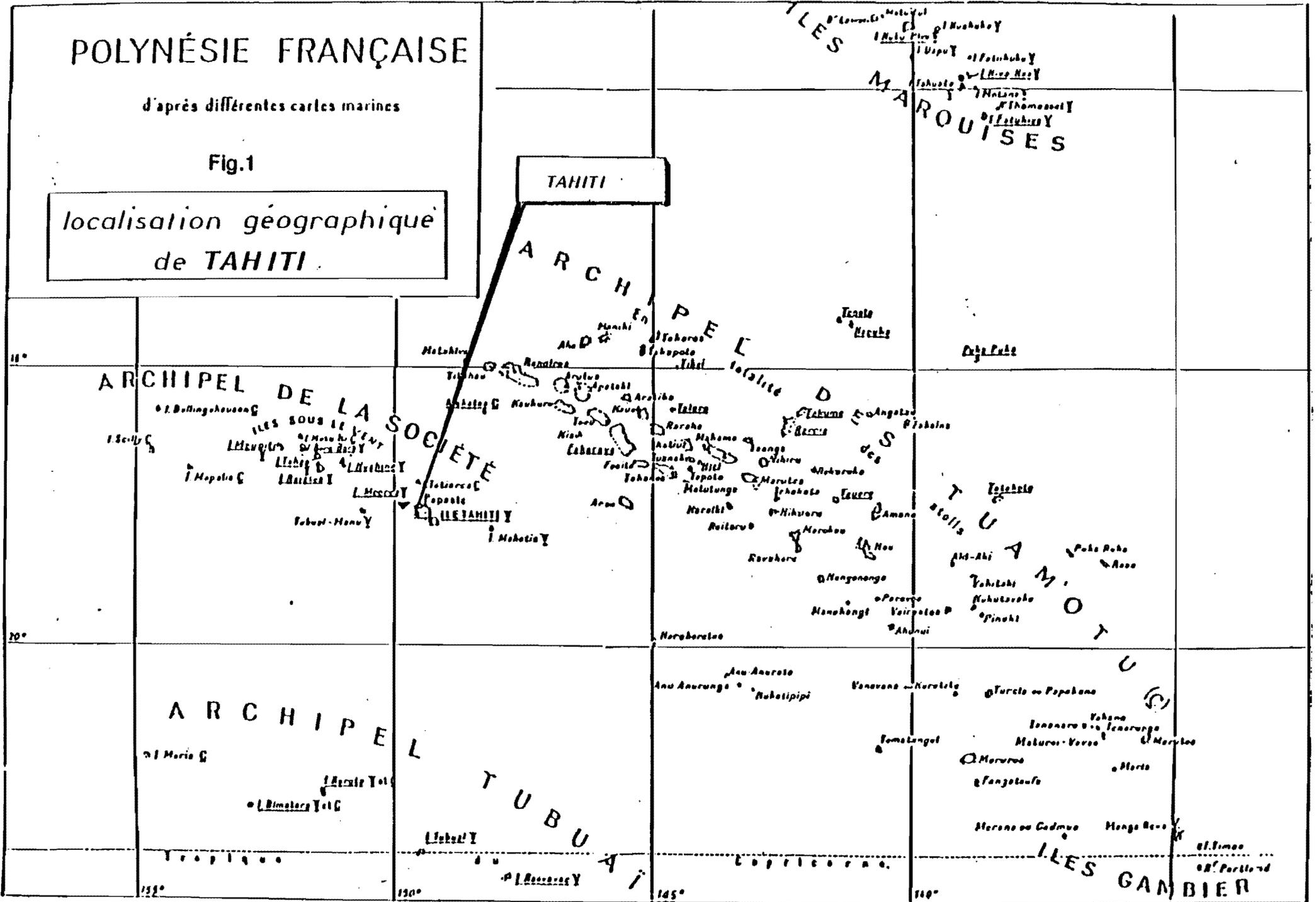
A l'issu de cet examen, l'étude permettra de dégager les incidences éventuelles du projet et de présenter les dispositions à prendre pour en annuler ou en limiter les effets.

POLYNÉSIE FRANÇAISE

d'après différentes cartes marines

Fig.1

localisation géographique
de TAHITI.



PRESENTATION DU SITE

Choix du site (figure 1)

Lorsqu'on examine la répartition des températures au sein des océans, on s'aperçoit que c'est au niveau des régions intertropicales et notamment équatoriales que l'écart de température entre la surface et le fond est le plus important.

Après quelques études préliminaires faisant intervenir des critères physiques (différence de température entre la surface et le fond), des critères bathymétriques (distance à la côte de l'isobathe 1000 m) et des critères d'ordre économique, le choix du site s'est porté sur la Polynésie Française et plus précisément sur l'île de Tahiti (figure 1).

L'île de Tahiti est située au milieu de l'océan Pacifique Sud, par $149^{\circ}30'$ de longitude Ouest et $17^{\circ}36'$ de latitude Sud. C'est l'île principale de l'archipel de la Société. Elle a une superficie de 1042 km² et elle est peuplée par 95 604 habitants. L'île est constituée par deux volcans éteints reliés par l'isthme de Taravao. Ces volcans sont entaillés de profondes vallées et le point culminant de l'île atteint 2237 m.

L'île est entourée, au Nord-Est, par un récif barrière de corail entrecoupé par endroits de quelques passes. Ce récif isole un lagon étroit et a permis la création d'une plaine littorale d'extension réduite. Le climat tropical (26° de moyenne) est rendu supportable par la présence des alizés.

Le site choisi pour l'implantation de la centrale E.T.M. est situé à proximité de la capitale de l'île : PAPEETE, c'est-à-dire dans la partie Nord-Ouest (figure 2), et plus précisément sur un terrain de 10000 m² localisé à l'extrémité Est de la grande digue qui protège le port. Ce terrain a été conquis sur la mer grâce à des remblais effectués sur le récif. La centrale se situe donc en plein centre de la zone industrielle et portuaire de Papeete. Cette position est avantageuse car le projet se trouve à proximité de zones de production économique importantes et son intégration à un site déjà profondément modifié ne soulève pas de problème particulier.

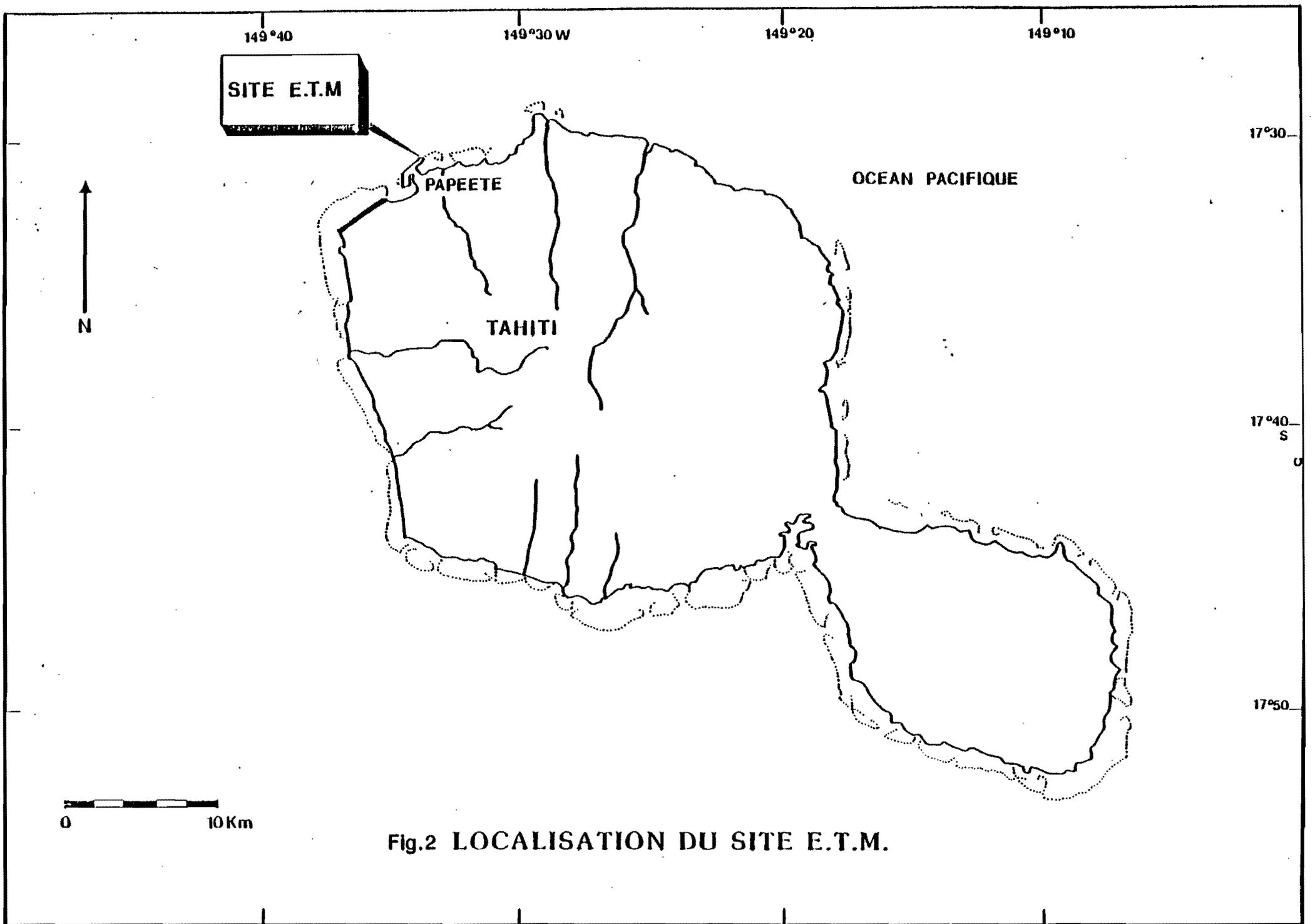


Fig.2 LOCALISATION DU SITE E.T.M.

LE PROJET

1. OBJECTIFS DU PROJET

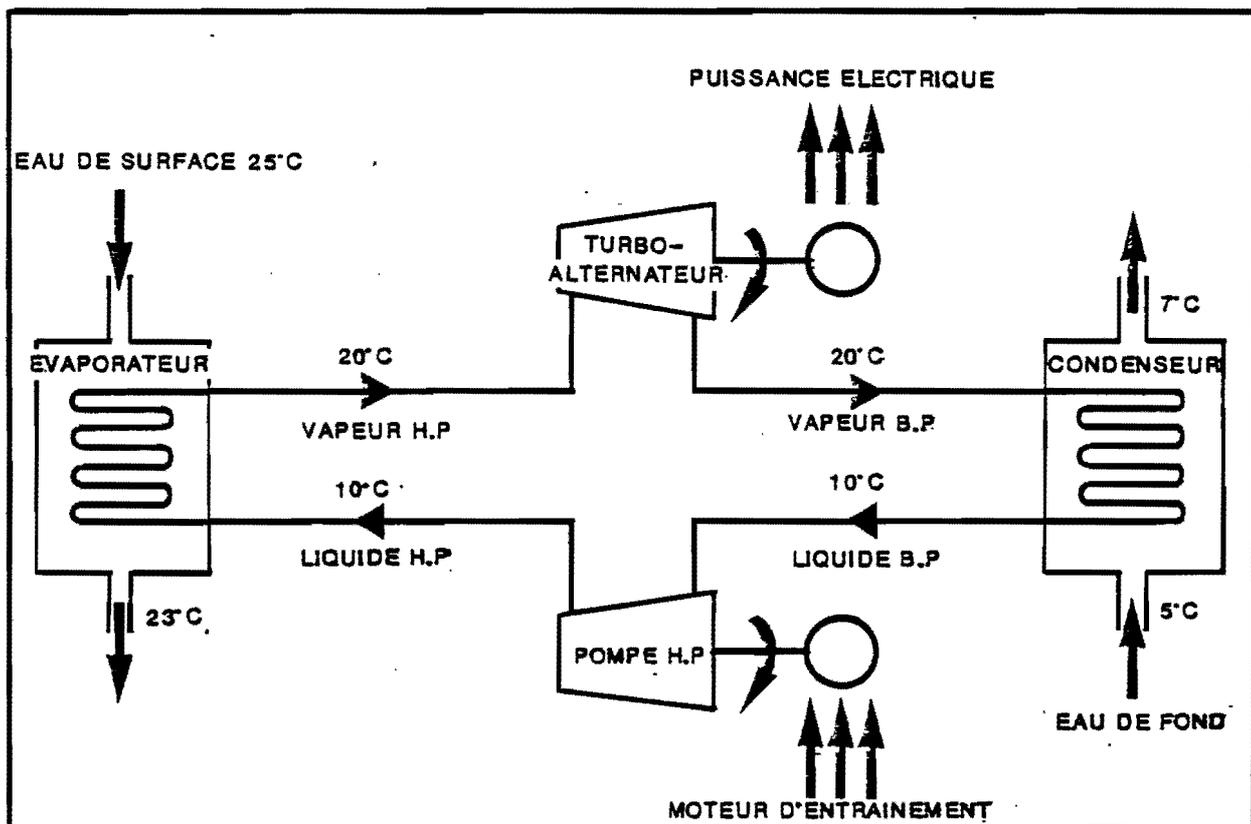
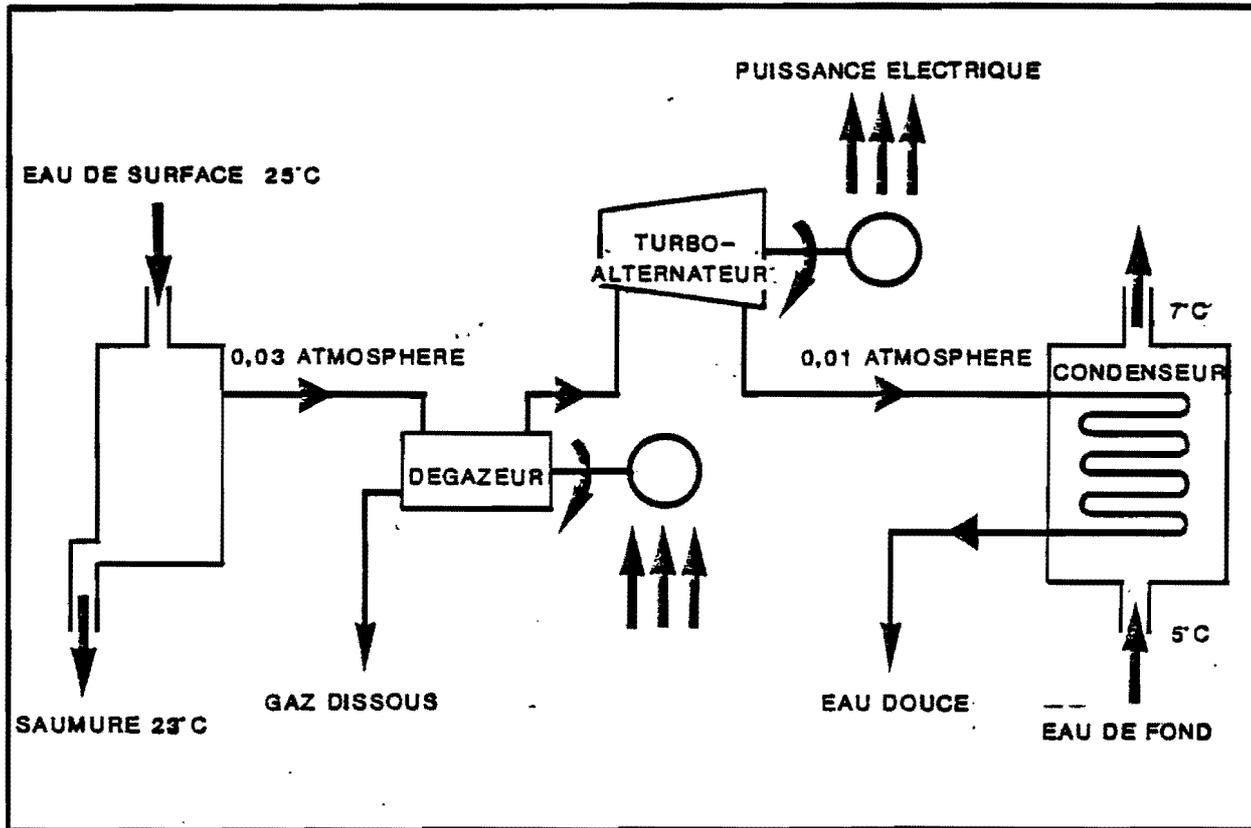
Les différentes études faites en France par l'IFREMER associé à des groupes industriels ont permis de fixer un certain nombre d'objectifs au projet E.T.M. de Tahiti, dont les principaux sont les suivants :

- une centrale pilote E.T.M. de puissance nette 5 MWe sera construite à Tahiti,
- la réalisation de cette centrale servira de banc d'essai pour la mise au point, l'évaluation des performances et l'optimisation des composants des futures centrales de production,
- la démonstration de la capacité du pilote E.T.M. à délivrer de l'énergie électrique sera testée,
- l'optimisation de cette production permettra d'en minimiser le prix de revient,
- la sous-production d'eau douce et de la glace sera envisagée,
- la possibilité d'utiliser une partie des eaux froides réchauffées ou non, à des expériences de conditionnement d'air pour locaux habités ou des expériences d'élevage marin sera également examinée.

2. DESCRIPTION SOMMAIRE DU PROJET

2.1. Généralités

Le pilote E.T.M. de Tahiti est un système de conversion de l'énergie thermique des masses d'eau de mer de surface (source chaude) en énergie mécanique, la source froide nécessaire au fonctionnement du système étant constituée des masses d'eau de mer profondes. L'énergie mécanique ainsi produite est ensuite convertie en énergie électrique.

USINE MARETHERMIQUE A CYCLE OUVERT (Projet Georges CLAUDE).

USINE MARETHERMIQUE A CYCLE FERME (Projet Clarence ZENER)
Fig.3

Deux options ont été étudiées :

- le cycle ouvert,
- le cycle fermé.

Dans le procédé à cycle ouvert (figure 3) l'eau chaude est admise dans une enceinte appelée évaporateur soumise à basse pression pour permettre la vaporisation de l'eau de mer. La vapeur ainsi formée traverse une turbine avant d'aller se condenser dans une deuxième enceinte, le condenseur, portée à une température voisine de 5°C grâce à la circulation des eaux de fond ; la pression qui y règne est environ 3 fois plus faible que celle de l'évaporateur.

Cette différence de pression est suffisante pour entraîner un turbo alternateur, à condition de donner à la turbine des dimensions importantes. La vapeur qui se forme dans l'évaporateur est constituée d'eau douce qui peut être recueillie dans le condenseur. Une telle installation fournit à la fois de l'énergie électrique et de l'eau dessalée.

Dans le procédé à cycle fermé (figure 3) on tourne la difficulté induite par la mise sous vide poussée de l'évaporateur et le dégazage subséquent de l'eau de mer, en utilisant un fluide de travail intermédiaire en l'occurrence l'ammoniac, lequel se vaporise vers 20°C sous une pression de quelques atmosphères, ce qui permet de faire tourner la turbine dans des conditions voisines de son usage initial.

L'eau chaude est donc admise dans un échangeur où le fluide se vaporise sous une pression de quelques atmosphères ; la vapeur se détend alors dans une turbine et se condense dans un échangeur refroidi par l'eau de fond. La turbine est couplée à un alternateur qui produit de l'électricité. Ce procédé ne permet pas de récupérer de l'eau douce, et la difficulté majeure réside dans la réalisation des échangeurs, qui doivent assurer un transfert thermique aussi bon que possible sous une différence de température très faible. En outre, les tubes de l'échangeur doivent résister à l'action corrosive de l'eau de mer, et donc être fabriqués à partir d'un métal noble tel que le titane par exemple.

Quelque soit l'option qui sera choisie in fine, sur le plan de l'environnement, le projet se caractérise avant tout par les dispositions qui ont été retenues pour les prises et rejets d'eau de mer (sous-système P.R.I.).

L'organisation générale des ouvrages de prise et rejet d'eau est la suivante :

- les prises d'eau chaude et froide se font en mer, par la conduite d'eau froide (C.E.F.) pour l'eau froide, et par un canal pour l'eau chaude,

- les rejets d'eau (eau froide et eau chaude mélangées) se font dans le lagon immédiatement à la sortie de l'usine (une variante rejets dans l'océan a également été étudiée).*

- l'atterrage de la C.E.F. est un atterrage court ; la C.E.F. est entièrement protégée sur environ 120 m (tranchée et cadre en béton armé), puis supportée sur le platier, jusqu'à 90 m de profondeur, par des écubiers fixes montés sur des tripodes métalliques gravitaires (une variante atterrage long existe également).

3. DESCRIPTION DETAILLEE DES OUVRAGES DE PRISE ET REJET D'EAU

3.1. Solution n° 1

Il s'agit de la solution la moins onéreuse.

3.1.1. Atterrage

3.1.1.1. Principe

L'atterrage court est composé d'une tranchée "berlinoise" couverte contenant la C.E.F. sur la partie déferlante du platier (fonds de - 7 m à - 8 m environ) prolongée par un ouvrage de sortie (cadre en béton armé) assurant la protection de la C.E.F. jusqu'aux fonds de - 15 m (déferlement de la vague centennale).

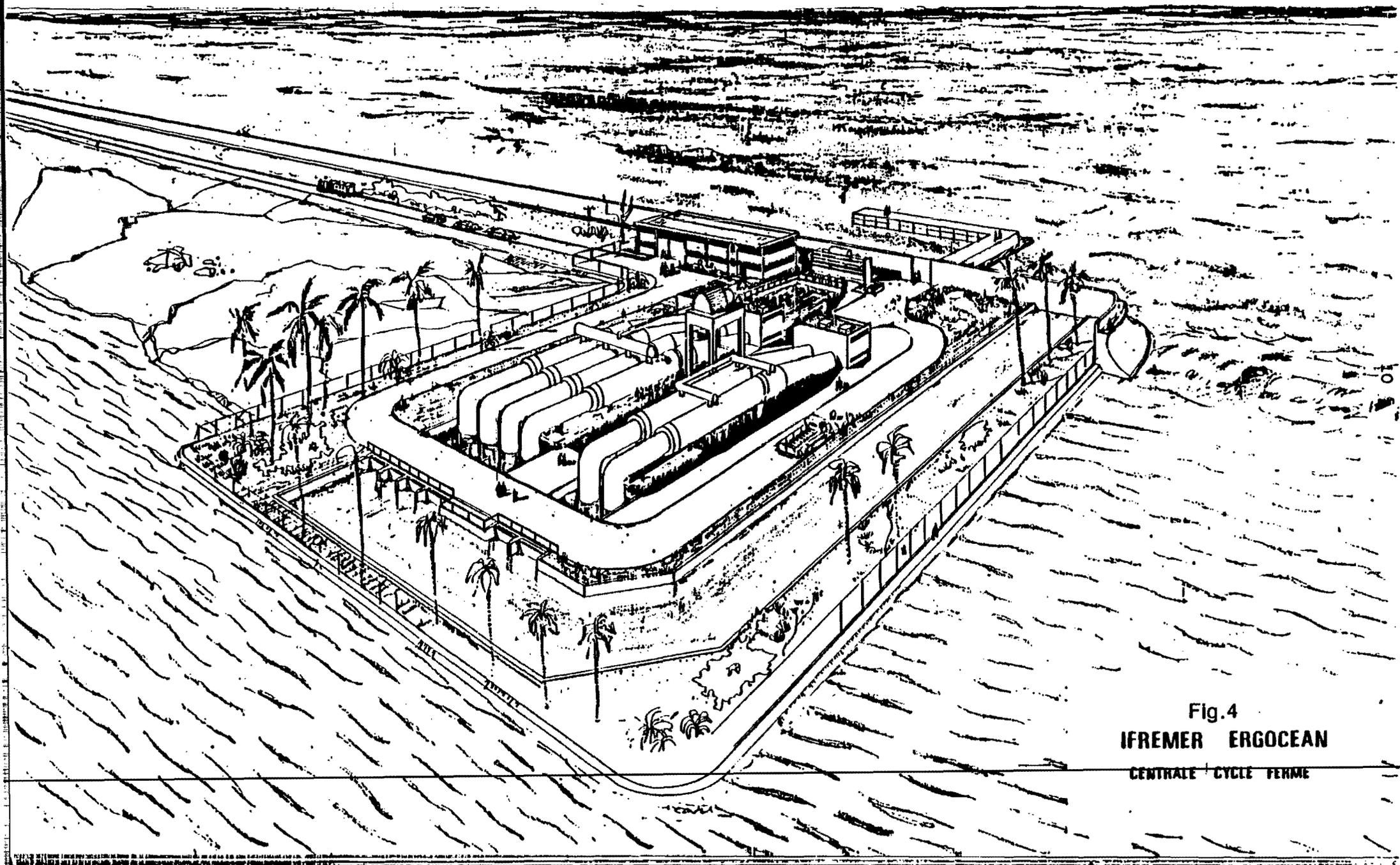


Fig.4
IFREMER ERGOCEAN
CENTRALE CYCLE FERME

La C.E.F. est ensuite flottante entre deux eaux et supportée sur le platier jusqu'aux fonds de - 90 m par 3 écubiers fixes montés sur des tripodes métalliques gravitaires.

3.1.1.2. Exécution

La tranchée est exécutée à partir d'une estacade provisoire réalisée à l'avancement sur des profilés métalliques battus. Le terrassement est réalisé à la pelle mécanique à l'avancement depuis l'estacade jusqu'à une profondeur de 8 m et à la benne preneuse ou à la "dragueline" ensuite. Les parties béton sont soit des éléments préfabriqués posés (couverture de la tranchée), soit réalisées en place (cadre de sortie) depuis l'estacade.

Les trois tripodes gravitaires en charpente et tubes métalliques sont assemblés dans le lagon, puis ancrés par flottaison et ballastés dans leur position définitive. Les écubiers sont ensuite fixés à demeure sur un chevêtre et mis en place sur les tripodes à partir d'une barge.

3.1.1.3. Profondeur de l'extrémité (axe)

- cadre de sortie de l'atterrage - 12,5 m,
- dernier écubier sur le platier - 46,5 m.

3.1.1.4. Longueur et section

Longueur de la tranchée : 96 m

Longueur du cadre de sortie : 20 m

Section de la tranchée : 3,65 m (l) x 5,00 m (h)

Section du cadre de sortie : 3,65 m (l) x 3,90 (h)

3.1.2. Eau froide

3.1.2.1. Débits

Le débit est défini en fonction du cycle retenu :

- cycle ouvert : $8,25 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$,
- cycle fermé : $10,50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$.

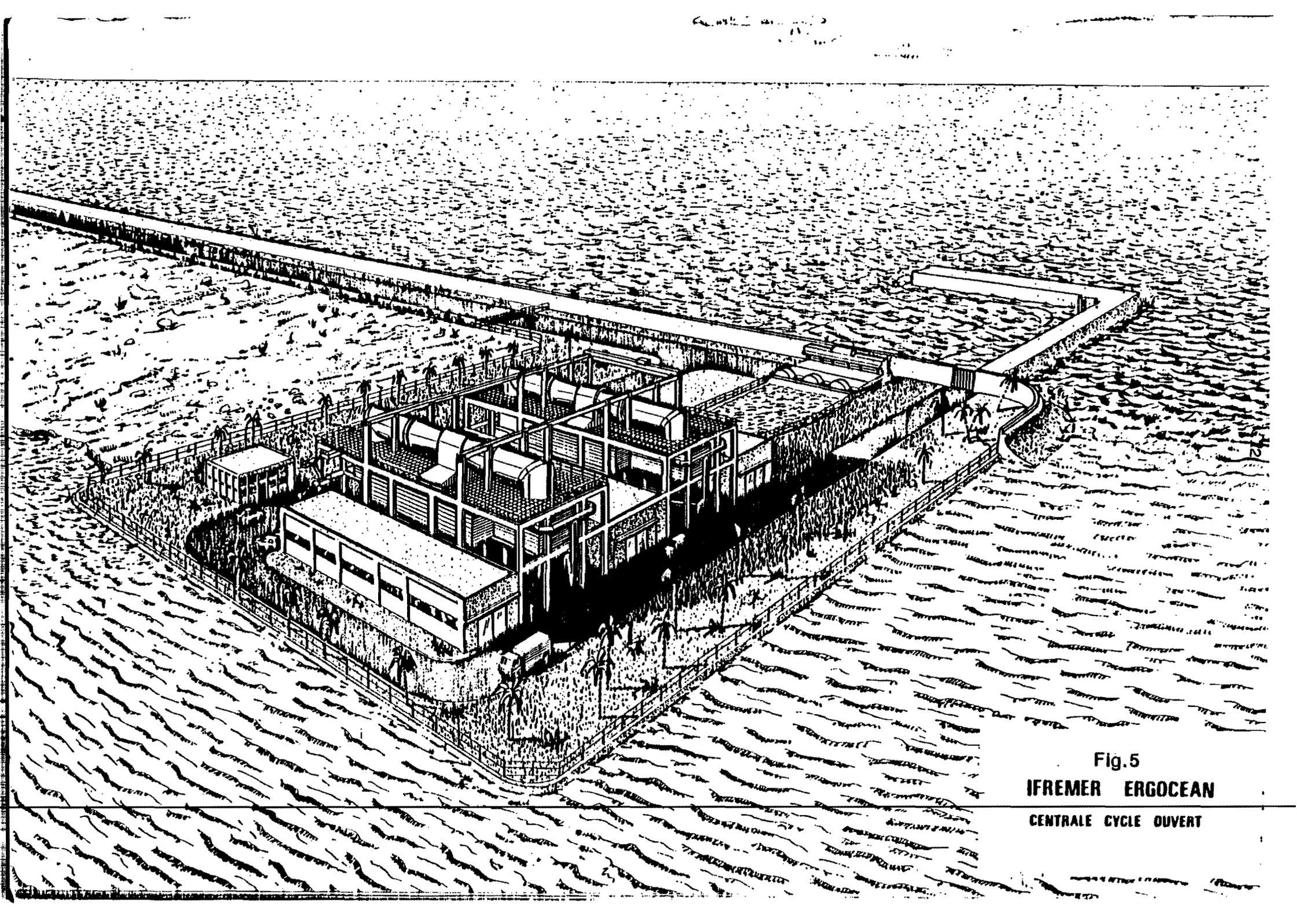


Fig.5
IFREMER ERGOCEAN
CENTRALE CYCLE OUVERT

3.1.2.2. Conduite d'eau froide (C.E.F.)

3.1.2.2.1. Configuration : "sur écuibiers suspendus"

La conduite qui possède un poids apparemment nul, est maintenue par l'atterrage sur le platier, puis tous les 200 m environ par des anneaux (les écuibiers) suspendus entre un flotteur en subsurface et un corps mort posé sur le fond.

La mise en place se fait, après la pose des écuibiers, par tirage à travers l'atterrage, à partir d'une barge ancrée à la verticale du dernier écuibier, au moyen d'un câble passant dans les écuibiers et sur une poulie de renvoi liée au dernier écuibier.

3.1.2.2.2. Profondeur de la prise d'eau : 700 m

3.1.2.2.3. Longueur : 1748 m

3.1.2.3.4. Diamètre intérieur

- cycle ouvert : 2,62 m

- cycle fermé : 2,77 m

2.1.2.1.5 Matériau

Il s'agit d'un sandwich en composite stratifié verre-résine (S.V.R.) composé d'une âme en mousse synthétique (résine polyester et microbilles de verres) entourée de deux peaux en S.V.R. réalisées par enroulement filamentaire.

2.1.2.2.6. Fabrication

La conduite est fabriquée par tronçons courts de 12 - 15 m, assemblés par collage en atelier en grands tronçons de 200 - 300 m. Ces tronçons sont stockés dans le lagon et sont raboutés mécaniquement dans le prolongement de la conduite au fur et à mesure du tirage lors de la pose.

3.1.2.2.7. Rejet d'eau froide (cf. § 3.1.3.3.)

3.1.2.2.8. Type

Le rejet s'effectue dans le lagon en canal, immédiatement derrière l'usine. Les eaux froides réchauffées sont entraînées avec les eaux chaudes refroidies vers le lagon de Taunoa, quand les courants sont orientés de l'Ouest vers l'Est (la plupart du temps), ou vers le port quand les courants s'inversent.

3.1.2.2.9. Profondeur du rejet : Axe : - 2 m.

3.1.2.2.10. Longueur et section

- Longueur : 10 m
- Section : 10 m (l) x 3 m (H)

3.1.2.2.11. Température

- Température de l'eau à la prise :
- Température au rejet : voir § 3.1.3.3.

3.1.3. Eau chaude

3.1.3.1. Débit : il est défini en fonction du cycle retenu :

- Cycle ouvert : 17,07 m³.s⁻¹
- Cycle fermé : 18,30 m³.s⁻¹

3.1.3.2. Prise d'eau chaude

La prise d'eau chaude est située en mer. Elle est constituée par un canal orienté vers l'Ouest. Le canal est protégé des houles dominantes du Nord-Est et du Nord-Ouest par un môle de 45 m de longueur en mer et prolongé par une digue de 45 m parallèle au rivage. La digue et le môle sont réalisés en éléments en béton préfabriqués cimentés in situ et cloués par des ancrages. La digue et le môle sont au niveau + 2,50 m N.G.F. et ont 5 m de largeur.

La profondeur de la prise d'eau se situe à - 2,5 m (Axe) ; sa longueur est égale, approximativement, à 50 m.

3.1.3.3. Rejet d'eau chaude

Le rejet d'eau chaude est mélangé au rejet d'eau froide. Il s'effectue en canal dans le lagon immédiatement derrière l'usine. Les eaux chaudes refroidies sont entraînées par les eaux froides réchauffées dans le lagon de Taunoa.

La profondeur du rejet d'eaux mélangées se trouve à - 2 m (axe).
Sa longueur est d'environ 10 m (débit = $25,32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ C.O.).
(débit = $28,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ C.F.)

Les températures de rejet sont les suivantes :

°C	Température eau froide	σ_t	Température eau chaude	σ_t	Température du mélange	σ_t
Cycle ouvert	11,34	26,363	25,59	23,645	20,60	24,551
Cycle fermé	10,28	26,554	10,28	23,603	20,11	24,587

N.8. : Rappelons que le débit d'eau chaude est environ deux fois plus important que le débit d'eau froide.

3.1.4. Traitement anti-salissures

Parmi les méthodes dont on dispose pour contrôler les salissures il y a des méthodes de prévention qui tendent à prévenir la fixation des larves planctoniques et des méthodes de nettoyage qui détruisent les individus adultes.

3.1.4.1. Prévention

Pour la prévention, un effort sera réalisé pour réduire dans les circuits d'eau de mer (principalement) le nombre d'endroits privilégiés pour la fixation des salissures : coudes, étranglements, accidents de surface. Le choix des matériaux aura aussi son importance. On sait, par exemple, que les alliages cuivreux restent nets de salissures ou que les revêtements antisalissures empoisonnent les micro-organismes, mais que leur efficacité dépasse rarement deux ans avant renouvellement. La prévention jouera aussi pour les prises d'eau en installant des filtres afin d'éviter l'aspiration de gros organismes, tels que poissons et macroplancton (méduses par exemple).

3.1.4.2. Nettoyage

les méthodes de nettoyage d'échangeurs concernent surtout le cycle fermé, puisque le cycle ouvert présente des surfaces d'échange beaucoup moins importantes et qu'a priori elles ne sont pas propices au développement des salissures en raison du vide qui règne dans les installations. On utilise simultanément les procédés de chloration et de nettoyage mécanique.

La chloration peut être appliquée de façon continue ou intermittente.

Le nettoyage mécanique qui utilise des balles spongieuses, plus ou moins denses (système AMERTAP et dérivés) qui sont entraînées automatiquement dans l'eau de circulation, s'avère efficace mais il est probablement insuffisant tout seul.

3.2. Variantes du projet

Un grand nombre de variantes ont été étudiées. Celles-ci entraînent le plus souvent un surcoût significatif.

3.2.1. Solution n° 2 : dite variante de référence

IFREMER a demandé que l'option prise et rejets d'eau hors lagon soient examinés pour limiter au maximum les incidences du projet sur l'écosystème lagunaire. La présente variante répond à cette demande. Les débits au rejet ainsi que les températures restent identiques.

La solution n° 2 permet d'effectuer les prises et les rejets en mer. L'atterrage de la conduite de rejets d'eau chaude est un atterrage long contenant la conduite d'eau froide jusqu'à 300 m de la côte, afin d'éviter tout risque de recyclage des eaux de rejet.

L'intérêt de cette variante réside dans l'absence totale de rejets d'eau froide ou refroidie dans le lagon. Tout risque éventuel de modification de l'équilibre biologique du lagon est ainsi écarté. Toutefois cette solution implique un surcroît de l'ordre de 6 % du prix total de la centrale, telle que décrite dans le paragraphe précédent.

3.2.2. Solution n° 3 : dite solution moyenne

Il s'agit d'un atterrage long avec rejet coaxial de l'eau froide à 300 m de la côte, le rejet des eaux chaudes ne faisant pas canal dans le lagon.

Dans cette solution, on évite le rejet d'eau froide dans le lagon.

PRESENTATION DE L'ETAT INITIAL DU SITE ET DE SON ENVIRONNEMENT
ANALYSE DE L'ETAT INITIAL

L'analyse de l'état initial a pour but de décrire l'environnement immédiat du site sur lequel sera implanté le projet, avant le début de la construction et de la mise en opération de la centrale E.T.M. La connaissance des caractéristiques de l'environnement est, en effet, fondamentale pour permettre une évaluation précise des impacts éventuels qui pourraient résulter de cette implantation nouvelle.

1. CARACTERISTIQUES CLIMATOLOGIQUES

Tahiti possède un climat tropical humide, tempéré par son insularité, la présence d'un relief important (point culminant 2237 m) et la présence des vents alizés. Il existe deux saisons assez faiblement marquées : une saison chaude et pluvieuse correspondant à l'été austral, et une saison relativement plus fraîche durant l'hiver austral (juin - septembre).

1.1. La température de l'air

Les températures moyennes de l'air oscillent entre 24°C et 27°C ; les maxima culminent à 32°C et les minima se situent vers 19°C. Le cycle annuel des températures se présente ainsi (figure 6) : en août et septembre on observe une saison fraîche (hiver austral), avec des températures voisines de 24,5°C. De décembre à avril, une longue saison chaude (été austral), avec des moyennes de 27°C. Les mois de mai, juin et juillet d'une part, et octobre et novembre d'autre part, constituent des mois de transition. Les écarts moyens saisonniers sont de l'ordre de 3°C, alors que les écarts moyens journaliers sont voisins de 7°C.

1.2. Humidité relative

La moyenne journalière relevée à FAAA (période 1958-1979) est quasi constante toute l'année : 75 à 79 %.

VARIATIONS ANNUELLES DES TEMPERATURES DE SURFACE
 DANS LE LAGON, L'OCEAN ET L'AIR

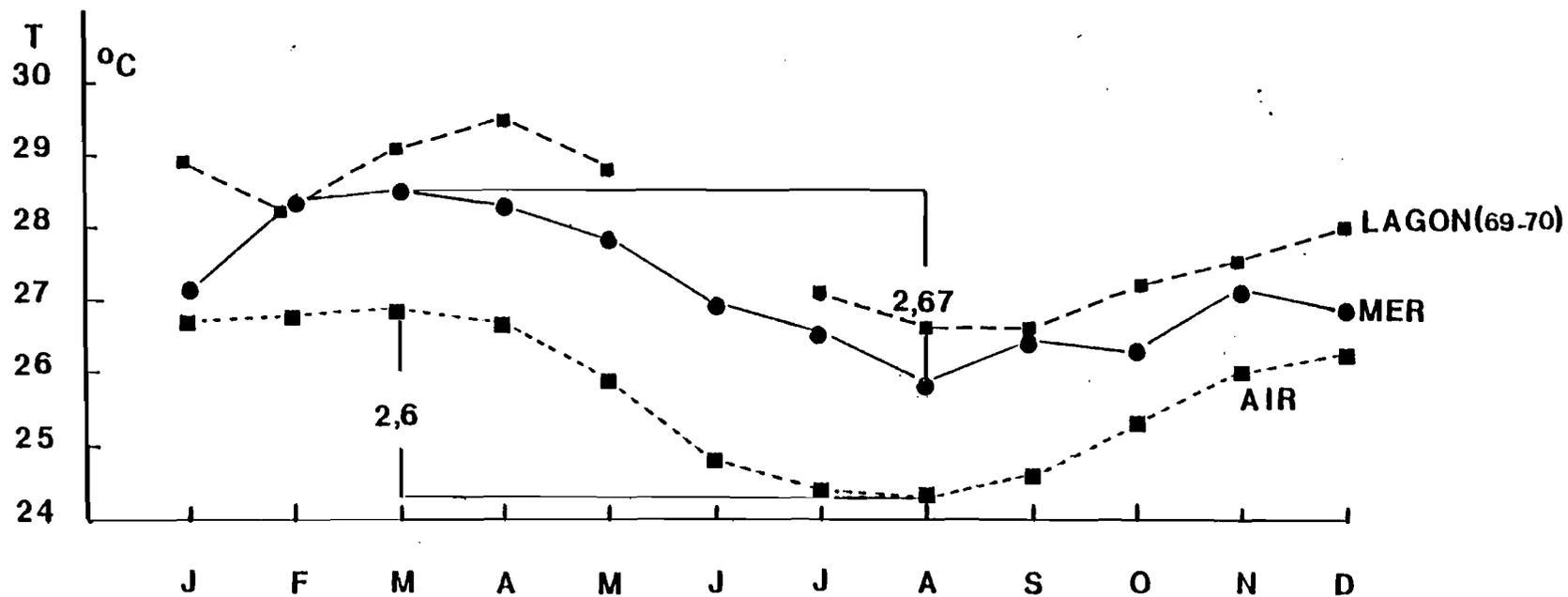


Fig.6

1.3. Nébulosité

Si la nébulosité moyenne mensuelle reste relativement faible, elle devient plus importante de novembre à février où elle atteint son maximum (6/8) : en général, elle est de l'ordre de 7 heures par jour.

1.4. Insolation

La durée moyenne annuelle de l'insolation a été de 2671 heures (période de 1958 à 1979) avec, pour 280 jours, plus de 5 heures d'ensoleillement, particulièrement au cours de la période juillet - septembre. L'insolation moyenne journalière a été égale à 7,48 heures par jour pour la période 1983 - 1985 (3 ans).

1.5. Précipitations

Les pluies sont dans l'ensemble abondantes, et particulièrement importantes en altitude. Au niveau de la mer, elles sont nettement plus élevées sur la côte Est de l'île (côte au vent) que dans les zones sous le vent (respectivement 3500 mm et 1700 mm par an). En été austral (saison des pluies), les fortes précipitations entraînent un lessivage important et les apports terrigènes dans le lagon sont abondants.

1.6. Rayonnement journalier moyen

Le rayonnement global moyen journalier varie peu au cours de l'année ; il présente cependant un minimum au mois de juin avec 1459 joules par cm². Le maximum s'observe au mois de novembre (2186.05 J/cm²) et la moyenne annuelle sur 3 ans est égale à 1526.2 joules par cm².

1.7. Vents

L'île de Tahiti est située dans la zone des alizés qui proviennent généralement du secteur Est - Sud-Est. Le site étudié étant situé au Nord - Ouest de l'île, le régime des vents se trouve modifié par les sommets de l'île. Il convient donc de manipuler l'ensemble des données de vent avec précaution. Les données de l'aéroport de FAAA indiquent ainsi que les vents dominants soufflent en priorité du Nord - Est puis du Sud. Les vents de Nord - Est sont les plus intenses et correspondent à l'axe d'orientation du

récif corallien. Les alizés sont habituellement modérés et leur vitesse est de l'ordre de 5 à 8 m.s⁻¹. Elle peut atteindre 10 à 15 m.s⁻¹ au cours de l'hiver austral.

Direction	Vitesses		
	> 2 m.s ⁻¹	> 6 m.s ⁻¹	> 10 m.s ⁻¹
Vent de secteur NE - E	35,5 %	10,8 %	1,1 %
Vent de secteur S - SW	13,5 %	2,2 %	0,3 %

1.7.1. Variations diurnes du vent

La variation diurne du vent est un phénomène régulier. Les vents de secteur Ouest à Nord s'observent rarement la nuit. Ils soufflent par contre fréquemment au cours de la journée.

Le vent de Nord-Est s'établit le matin vers 9 heures pour disparaître à la tombée de la nuit vers 18 heures, avec un maximum de fréquence et de vitesse entre 10 et 15 heures. Les vents de Sud - Sud-Est à Sud - Sud-Ouest atteignent leur vitesse maximum la nuit entre 20 et 05 heures.

Heures	02	05	08	11	14	17	20	23
Vitesse moyenne (m.s ⁻¹)	2,6	2,5	2,8	4,8	5,2	4,5	2,8	2,5

Tableau 1 : Répartition des vitesses moyennes au cours de la journée
(in CETE, 1986).

VENT AU SOL

VALEURS MOYENNES

	02	05	08	11	14	17	20	23	Moyenne
Vent moyen m/s	2,1	2,1	2,3	4,1	4,4	3,8	2,4	2,1	2,9 *

Fluctuations normales saisonnières

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne ou maxi	
Vent moyen V m/s	3,2	3,2	2,7	2,5	2,6	2,6	2,9	3,1	2,9	3,0	3,1	3,2	2,9 *	
Vent moyen maxi	V m/s	22	18	17	16	15	15	17	18	15	15	18	19	22
	D degré	02	06	34	24	22	14	04	04	06	02	36	02	02/04
Vent instantané maxi	V m/s	27	23	22	21	20	19	21	23	18	19	23	24	27
	D degré	06	34	04	22	06	18	08	04	06	18	18	06	06

* Direction dominante : 45°

Valeurs extrêmes de sauvegarde : - Vent moyen maxi : 27 m/s du 18
 - Vent instantané maxi : 45 m/s du 20

1.7.2. Vitesse maximale du vent

La plus grande proportion de vitesse de vent moyen supérieur à 13 m.s^{-1} (45 cas pour 3479 observations de vent supérieures à 4 m.s^{-1}) provient du secteur Nord - Nord-Est et Nord - Est.

Les vitesses de vent moyen (calculées sur 10 mn) sont généralement plus fortes pendant la saison chaude.

	NNE/ENE	N/NW	WNW/WSW	SW/S	SSE/E
Saison pluvieuse (%)	55	26	10	5	4
Saison sèche (%)	64	10	2	22	2

Tableau 3 : Répartition des coups de vents ($V > 13 \text{ m.s}^{-1}$) entre la saison sèche et la saison des pluies (in CETE, 1986).

2. CARACTERISTIQUES GEOMORPHOLOGIQUES ET BATHYMETRIQUES

2.1. Généralités

L'originalité des lagons d'îles hautes tient au développement, à une certaine distance du rivage, de récifs compacts généralement peu profonds qui isolent le plan d'eau du lagon de l'océan.

Dans les cas typiques, le récif corallien se trouve limité du côté océan par une crête, à peine immergée, sur laquelle déferle la houle. Les mouvements de la mer érodent les formations récifales et les débris vont s'accumuler dans les zones abritées où les sédiments d'origine terrestre

viennent les colmater. Le résultat de ces transformations progressives à l'échelle des temps géologiques conduit à la succession géomorphologique suivante :

- le littoral
- le récif frangeant
- le chenal (lagon)
- le récif barrière
- la pente externe

2.2. L'environnement lagonaire (figure 7)

Dans le Pacifique Sud, les lagons d'îles hautes peuvent se présenter sous des aspects différents : ou bien le récif barrière est éloigné de plusieurs kilomètres de l'île, et délimite ainsi un lagon large et profond de plusieurs dizaines de mètres (Nouvelle-Calédonie), ou bien le récif barrière est proche de l'île (< 1 km) et les formations coralliennes croissent sur des fonds peu profonds (quelques mètres) (MOOREA, îles de la Société). Le milieu étudié ici représente un cas intermédiaire : d'une part le récif barrière est proche de la côte (150 à 300 mètres) et, d'autre part, il est séparé de l'île par un chenal profond (35 mètres).

Ce lagon est limité à l'Ouest par la zone portuaire de Papeete qui débouche dans la passe de Papeete, large de 150 m à l'endroit le plus profond (11 mètres environ). A l'Est du chenal se situe la baie de Taone qui débouche en mer par la passe de Taunoa qui a 350 mètres de largeur et qui atteint une profondeur maximum supérieure à 50 mètres.

Le récif frangeant qui borde la côte est dispersé et peu développé. Les parois du chenal sont assez abruptes et le fond du lagon est constitué de sédiments d'origine détritique provenant soit des édifices récifaux, soit de l'île volcanique par l'intermédiaire des eaux de ruissellement. Trois torrents d'importance inégale contribuent à ces apports : la Papeava, véritable égout de la ville de Papeete, la Fautau, de loin la plus importante (bassin versant de 2410 ha, débit cinquantenaire de crue estimé à 300 m³/s.) et la Hamuta.

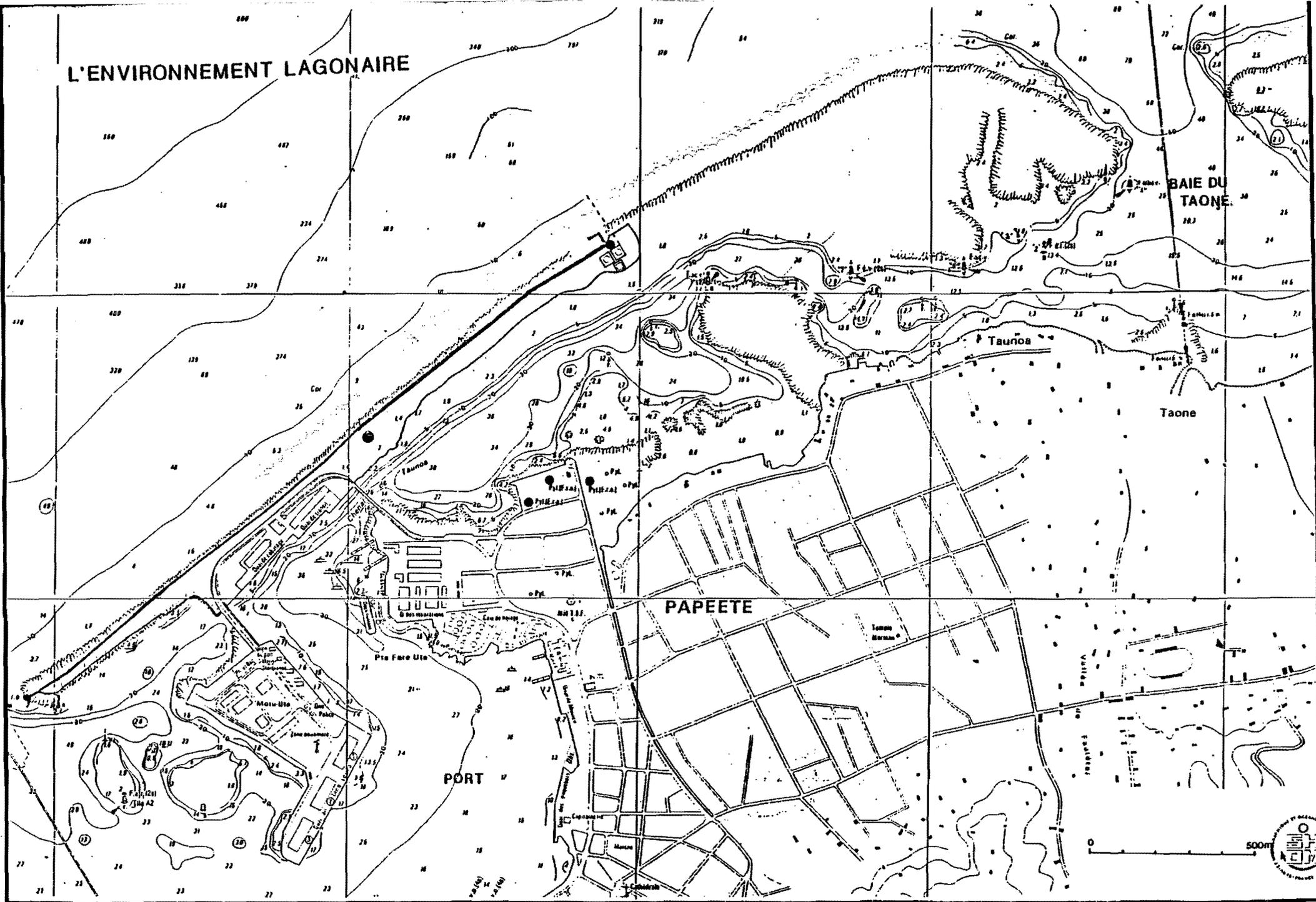


Fig.7

2.3. La pente externe

2.3.1. Bathymétrie générale (ROBERT, 1983)

Jusqu'aux campagnes CNE XO (ex. IFREMER) de février et avril 1982, aucun document n'existait sur le secteur Nord - Ouest de Tahiti, si ce n'est des cartes SHOM à petite échelle (1/25000 - 1/10000).

Des deux missions citées, ayant mis en oeuvre successivement un sondeur multifaisceaux à pinceaux étroits ($2^{\circ} \frac{2}{3}$), puis un sondeur classique (9° d'ouverture,) en complément des résultats du précédent, sur 0-200 m et sur les deux zones de "Faaa" et de "Papeete", on tire les résultats suivants :

La zone étudiée est caractérisée par un certain nombre de particularités :

- deux caractères morphologiques en zone de faible profondeur :
 - . l'existence d'empâtements dans les premiers 300 m de profondeur (50 - 300 m), qui aboutit à faire incurver les isobathes d'une part et d'autre part, à adoucir la pente en son début (puis forte rupture ensuite),
 - . la présence de petites failles parallèles entre elles et perpendiculaires à la côte, en réseau dense, se développant au moins jusqu'au genou,
- trois caractères morphologiques en zone profonde :
 - . l'inexistence de pointements ou édifices volcaniques (comme dans le Nord - Ouest = zone Faaa) qui perturbent la morphologie générale,
 - . le parallélisme global des isobathes dans les 800 premiers mètres, indiquant un "calme" morphologique général relatif,
 - . l'existence de crêtes sous-marines avec couloirs associés, crêtes parallèles entre elles, de 200 - 300 m de largeur et de longueur d'onde, perpendiculaires à la côte et se levant à partir de 800 - 900 m de profondeur.

2.3.2. Morphobathymétrie

Cette phase, complémentaire de la précédente dans la connaissance de la morphologie de détail (accidents d'ordre métrique), a été concrétisée par une campagne de photographies sous-marines en mai 1983, à l'aide de l'engin RAIE : poisson "passif" à câble évoluant à une distance du fond de l'ordre de 4 à 8 m, équipé d'un système de prises de vues (caméras 16 et 28 mm - couleur essentiellement) en quasi continu (16 secondes) et d'un sondeur 100 kHz pour la microtopographie. Près de 15000 photos ont été prises pour déterminer les différents faciès morphologiques rencontrés.

Une série de plongées sous-marines utilisant le sous-marin CYANA a permis de compléter l'ensemble des données de morphobathymétrie.

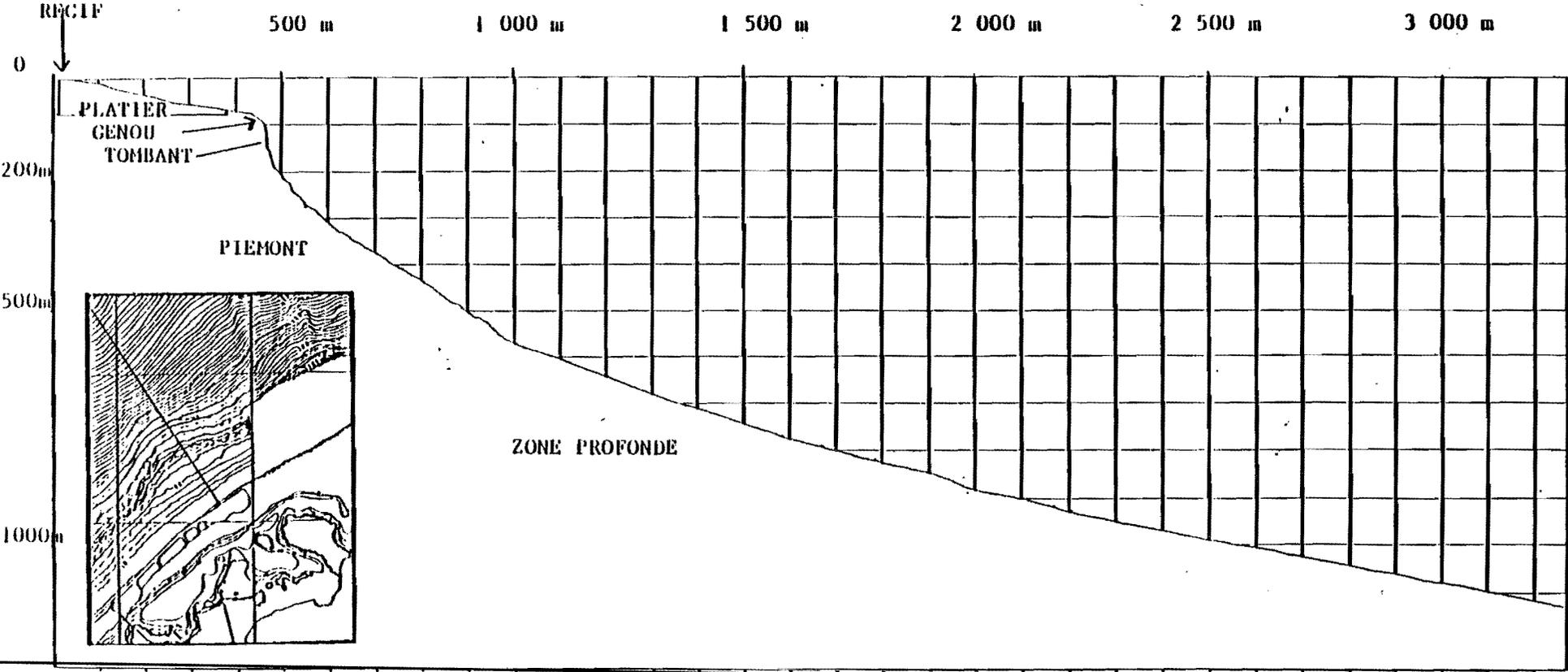
Du littoral vers le large on distingue (figure 8) (in CETE, 1986 ; COCHONAT et al., 1986) :

2.3.2.1. Le platier qui comprend (pente moyenne 8°) :

- la plate-forme rainurée (entre 0 et - 5 m à - 7 m) : la largeur de cette unité (bien visible sur les photographies aériennes) est d'environ 100 mètres. Les rainures ou sillons perpendiculaires au littoral, ciselés dans le récif par les effets des houles sont particulièrement nombreux (60 ont été dénombrés sur un linéaire de côte d'environ 2000 m). Leur largeur est de quelques mètres et leur profondeur maximale est d'environ 3 mètres. Les versants sont le plus souvent verticaux dans leur partie amont et prennent une pente plus douce en aval. Le fond des sillons est encombré de gros galets. La faune ichtyologique y est abondante ;

- la zone à contreforts et vallons (entre - 5 m à - 7 m et - 15 m à - 25 m) : sa largeur est inférieure à 75 mètres. Elle est composée d'une alternance de vallons et contreforts, perpendiculaires au littoral, la largeur des vallons et leur profondeur sont très variables, quelques mètres à l'amont et environ 10 à 30 mètres à l'aval.

Fig.8 : COUPE TOPOGRAPHIQUE DU SITE ETM



2.3.2.2. Le Genou

Sa reconnaissance n'a pas donné les résultats attendus avec CYANA (trop faible profondeur d'eau et proximité de la vague déferlante en surface) et avec le sonar latéral (pente trop forte). Cependant, les observations réalisées avec CYANA dans la partie inférieure du Tombant semblent montrer d'une part un **passage progressif** de la pente faible du platier à la falaise du Tombant et, d'autre part, l'existence d'un réseau de **chenaux** entaillant le Genou par une succession de "V" topographiques. Il n'existe actuellement aucun argument pour dire si cette morphologie se greffe sur un champ de fracturation éventuel, ce qui risquerait de poser des problèmes de stabilité globale du massif en ce point d'ancrage possible.

2.3.2.3. Le Tombant (pente moyenne : 65 à 90°)

Il se présente comme une falaise quasi verticale constituée de **calcaires récifaux construits** ou de **débris coralliens consolidés**. L'ensemble paraît assez homogène. Aucune trace d'écoulements récents n'a été identifiée mais les plongées CYANA ont rencontré la présence de **blocs métriques et décimétriques** d'origine corallienne sur le piémont et en partie haute de la zone profonde.

Des couloirs verticaux (largeur d'environ 1 m) semblent être le lieu de transit sédimentaire d'éléments détritiques en liaison avec une chenalisation éventuelle du Genou.

Même si le Tombant paraît sain, rien ne permet aujourd'hui de garantir sa stabilité à long terme, surtout si des sollicitations extérieures viennent rompre l'équilibre actuel, et d'autant plus que son observation directe est toujours gênée par un encroûtement de surface permanent.

2.3.2.4. Le Piémont

Dans sa partie supérieure (pente proche de 45° vers 200 à 300 m de profondeur), en **piéd de falaise**, on peut observer une **accumulation de blocs coralliens mêlés à des encroûtements**. L'ensemble est parfois cahotique. Les

encroûtements forment des éléments de plaques d'épaisseur centimétrique à décimétrique **très instables**. On observe parfois des amoncellements du type "pile d'assiettes renversées" suite au glissement des plaques dans la pente. On peut considérer cette zone comme une zone en équilibre instable.

Dans la partie inférieure (300 à 400 m de profondeur), les encroûtements toujours présents semblent moins instables avec la diminution de pente (30°). Les encroûtements apparaissent comme un **phénomène pelliculaire** ennoyant le substratum basaltique sub-affleurant et d'apparence saine. Ces encroûtements semblent également recouvrir des blocs calcaires coralliens éboulés. Hormis dans sa partie basale où le basalte sain apparaît à l'affleurement, le Piémont se présente donc comme une zone **superficiellement instable**.

Par ailleurs, tout le Piémont montre une structure radiale faisant ressortir des éperons basaltiques qui forment des reliefs de plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres de haut. Il est possible que cette structure se rattache à un système de failles anciennes plus profondes qui découpent le substratum basaltique sur le pourtour de l'île.

2.3.2.5. La zone profonde (pente moyenne : 17°)

Aucun indice net de glissements en masse ou de phénomènes turbiditiques récents n'a été décelé. Cependant, compte tenu de la pente importante, un glissement en masse reste très possible. D'autre part, les levés de carottes ne semblent pas montrer, dans les couches superficielles, les séquences habituellement caractéristiques des turbidites. L'apport sédimentaire actuel à l'amont paraît trop faible pour établir des conditions de départ de turbidites qui ont pu exister anciennement.

Cette apparente stabilité ne doit pas faire oublier que dans un tel contexte topographique l'équilibre peut être rompu par une cause extérieure (pose de fondation ou évènement sismique).

3. CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES

3.1. La houle

La connaissance des houles dans la zone de Tahiti est encore imparfaite puisqu'en dehors du houlographe du port de Papeete, il n'existe pas de points de mesures en Polynésie française, mises à part quelques données ponctuelles relevées dans l'archipel des Marquises. Les données présentées ici proviennent des éléments fournis par la Météorologie Nationale (antenne de Faaa) (in CETE, 1986) ainsi que des travaux de CAVANIE (1983) et SCHOPP (1983) réalisés dans le cadre du projet E.T.M. Par ailleurs, des données récentes correspondant aux mesures faites par l'IFREMER sont fournies sous forme de tableaux (KESSLER et MONBET, 1984, 85 et 87).

3.1.1. Provenance des houles dans la zone de Tahiti (figure 9)

- les houles de secteur Nord (320° à 40°) sont engendrées dans le Pacifique Nord - Ouest où l'on rencontre les vents les plus forts, surtout au cours de l'hiver boréal (décembre à février),

- les houles de secteur Sud - Est (110° - 160°) qui se forment sous l'influence des alizés,

- les houles de secteur Sud et Sud-Ouest (170° - 250°) formées dans les régions polaires australes,

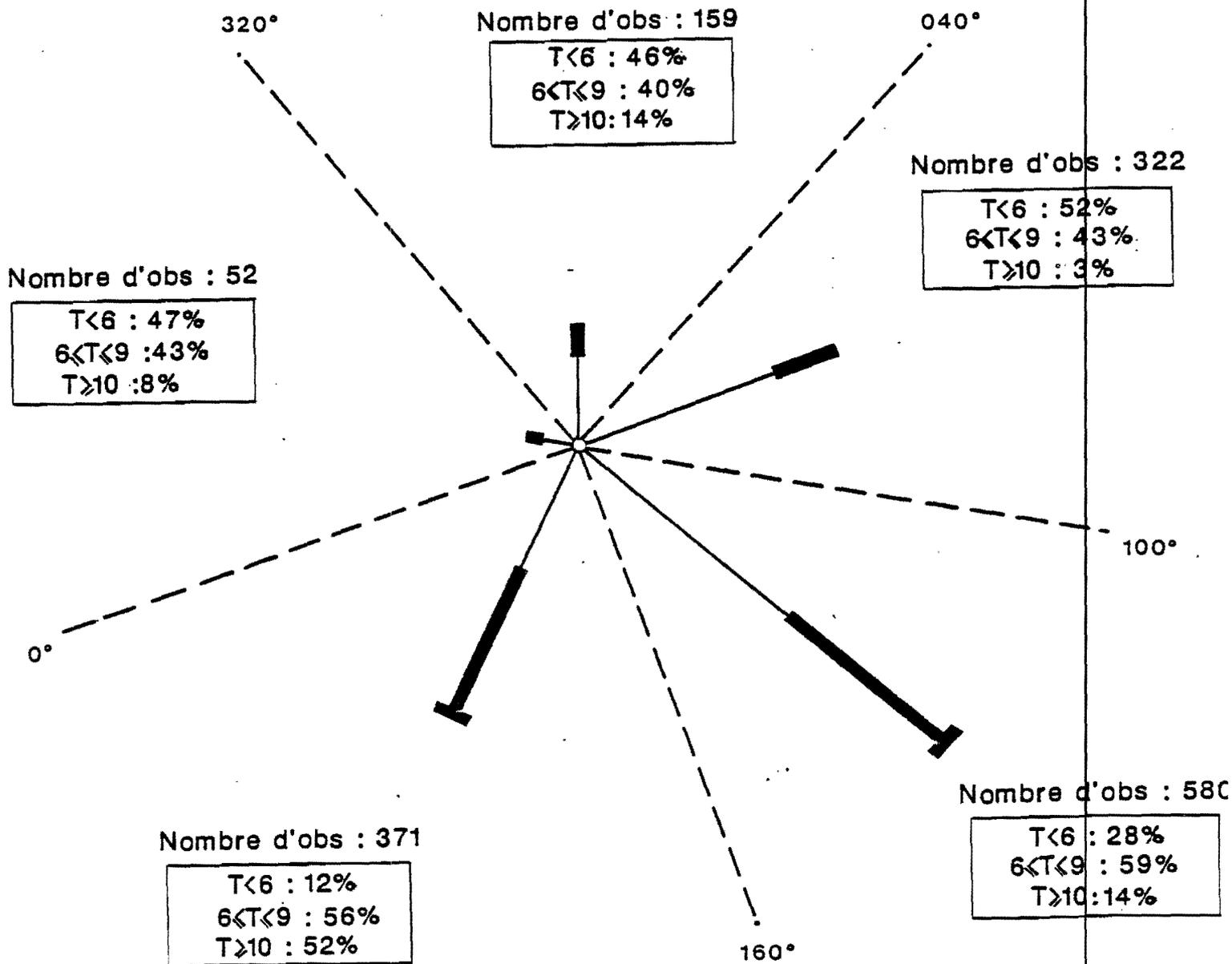
- les houles de secteur Ouest (260° - 310°) qui proviennent de dépressions ou cyclones tropicaux.

Dans la zone d'étude, seules les houles de secteur Nord - Est à Nord -Ouest auront une importance prépondérante.

REPARTITION DES HOULES

AIRE 61572

Nombre total d'observation : 1484



LEGENDE

$h < 2m$ $2m \leq h < 4m$ $h \geq 4m$

echelle : 0 20%

Fig.9

3.1.2. Conditions extrêmes des vagues d'après les données de vent (SCHOPP, 1983)

L'estimation de hauteurs de vagues au cours de coups de vent est faite en supposant le fetch illimité et la croissance des vagues limitée par le temps pendant lequel le vent souffle. Ce type de problème n'a pas de solution vraiment satisfaisante, les mesures à la mer portent principalement sur le développement de l'état de la mer en fonction du fetch. Ainsi, d'après la formulation du spectre de JONSWAP :

$$(1) H_{1/3} = 5,1 \cdot 10^{-4} \sqrt{x} U$$

$$(2) f_m = 3,5 (g^2 / Ux) \cdot 0,33$$

où x est le fetch en m, U la vitesse du vent à 19,5 m en m/s et f_m la fréquence au pic du spectre.

Pour savoir comment se fait la croissance de l'état de mer en fonction du temps et non en fonction du fetch, nous avons fait l'hypothèse que se déplacer dans l'espace à la vitesse de groupe C_g du pic :

$$(3) C_g = g / (4\pi f_m)$$

dans le cas d'un fetch limité, cela correspond à suivre la croissance dans le temps pour un fetch illimité.

Alors, d'après (2) et (3) :

$$(4) C_g = \frac{dx}{dt} = (gxU)^{1/3} / (14\pi)$$

Intégrant cette équation en posant $x = 0$ pour $t = 0$, l'on trouve :

$$(3/2) x^{2/3} = (14\pi)^{-1} (gU)^{1/3} t$$

soit :

$$(5) x = [(t/21\pi)^3 g U]^{1/2}$$

Substituant cette expression dans l'équation (1) et prenant "t" en heures et "U" en m/s, l'on trouve :

$$(6) H_{1/3} = 0,0181 U^{5/4} t^{3/4}$$

La croissance de $H_{1/3}$ ne peut être illimitée, mais s'arrêtera lorsque la mer du vent sera pleinement développée, ce qui correspond au spectre de PIERSON et MOSKOWITZ. La hauteur $H_{1/3}$ pour la mer pleinement développée est donnée par :

$$(7) H_{1/3} = 0,0212 U^2$$

En égalant (6) et (7), on trouve que le temps limite de croissance t_{max} est donné par l'équation :

$$(8) t_{max} = 1,23 U$$

avec t en heures et U en m/s

Les états de mer extrêmes au cours des coups de vent ont été calculés à partir des courbes de la figure 2, établies d'après les équations (7) et (8). Les vents mesurés toutes les trois heures ont été supposés constants pendant cette période, le croissance de $H_{1/3}$ se faisant sur la courbe correspondante. Evidemment, seuls les cas de vent de secteur Nord - Est à Nord - Ouest ont été considérés.

La loi de distribution des $H_{1/3}$ maxima annuels doit suivre, comme celle du vent, d'assez près une loi double exponentielle. L'interprétation sur les courbes extrêmes possibles donne les valeurs suivantes :

$H_{1/3}$ (m)	Minimum	Maximum
Décennal	3,9128	4,4128
Cinquantenaire	5,2065	5,9268
Centenaire	5,7535	6,5668

En multipliant les valeurs minimales par 1,8 et les valeurs maximales par 2, on obtient la fourchette des valeurs des hauteurs individuelles les plus probables, H :

H (m)	Minimale	Maximale
Décennal	7,04	8,83
Cinquantenaire	9,37	11,85
Centenaire	10,36	13,13

Ces valeurs sont nettement inférieures à celles de $H = 19$ m que l'on peut estimer grossièrement pour un cyclone balayant la zone du site, compte tenu de l'absence de mesures.

A la hauteur de la vague de projet, il faut associer une période ou plutôt une gamme de périodes possibles. Compte tenu que les états de mer les plus sévères sur le site sont liés à la mer du vent, la gamme de périodes individuelles, , doit satisfaire la relation (2) :

$$6,7 h < T < 10,8 H$$

	$H_{1/3 \text{ max.}} (m)$	H individuelle max (m)	Périodes associées (S)
Trois ans	3,2	6,4	6,5 à 8,3
Decennal	4,4	8,8	7,7 à 9,8
Cinquantenaire	5,9	11,9	8,9 à 11,3
Centenaire	6,6	13,1	9,4 à 11,9

Tableau 4 : Hauteur de la houle (H_{max} et $H_{1/3}$) et périodes associées.

3.1.3. Remarques concernant les vagues liées aux cyclones (CAVANIE, 1983)

Notre connaissance des cyclones sur la Polynésie française est extrêmement limitée, compte tenu des difficultés d'observations et de l'étendue de la zone couverte. D'après les publications de la Météorologie Nationale, il est passé douze cyclones de 1900 à 1978 sur cette région, ce qui correspond à une moyenne d'un cyclone tous les six ans. Cette notion est d'ailleurs trompeuse, car le passage de ces cyclones semble être lié à des conditions climatiques particulières, et ils se regroupent au cours de certaines années (2 en 1970, 1978 et 1983).

Si l'on considère seulement Tahiti, zone d'observation la mieux documentée, il y a eu cinq cyclones observés de 1830 à 1983 à proximité de l'île, dont deux au cours de cette dernière année, soit, en moyenne, un tous les trente ans.

Les enregistrements de vagues sur le site E.T.M. n'indiquent pas de fortes vagues au moment du passage des deux cyclones en 1983 (maxima enregistrés : 5 à 6 m), la côte ayant protégé le site des vents d'Est à Sud-ouest. Il apparaît donc que les possibilités d'atteindre des états de mer sévères dépendent non seulement de la probabilité de passage du cyclone à proximité de Tahiti, mais aussi de sa trajectoire aux abords de l'île. Des vagues d'une hauteur estimée à vue, de 15 m, ont été observées sur la côte Est de l'île lors du dernier cyclone.

La nature des cyclones, leur faible probabilité annuelle, la protection offerte par la côte ne permettent pas d'employer les notions classiques de vague centenaire ou décennale. A notre connaissance, aucune mesure précise d'état de la mer n'a été faite au cours de cyclones en Polynésie française. De la connaissance des états de mer de cyclones dans d'autres régions, l'on peut estimer les vagues individuelles les plus hautes à $19 (\pm 3)$ m. Mais leur probabilité annuelle sur le site de la centrale doit être nettement inférieure à 1 % sans que l'on puisse l'évaluer précisément.

La gamme de périodes associées aux hauteurs de vagues de cyclones correspond à des périodes plus courtes que pour la mer du vent en général (3) et doit être dans la bande : $5,6 H < T < 9,1 H$.

3.2. Les courants et la circulation des eaux

Il existe un nombre de mesures de courant assez important dans la zone étudiée. Près de 3 années de mesures ont été effectuées au cours de l'étude E.T.M. par l'IFREMER, sur la pente externe récifale et à des profondeurs s'étageant de - 20 m à - 900 m. Dans le lagon, on dispose de mesures ponctuelles (durée 1 mois maximum) réalisées par le C.E.A. (FRAIZIER, 1980 ; DE NARDI et al., 1983). A la sortie de la passe de Taunua, le CETE d'Aix (PORCHER, 1986) a entrepris une série de mesures en surface et à - 60 m à l'occasion de son étude concernant le choix des sites de rejet en mer des eaux usées de la ville de Papeete.

Si les valeurs absolues des vitesses de courant ainsi que leur direction sont connues avec une précision certaine, il n'en demeure pas moins que l'interprétation de la circulation générale des masses d'eaux dans la zone est difficile car les conditions hydrodynamiques sont étroitement dépendantes des phénomènes tels que la houle qui contribue au remplissage du lagon, la marée et les vents. Il convient également de souligner que les conditions hydrodynamiques des masses d'eaux qui circulent au fond du lagon sont mal connues.

Il sera donc proposé dans les pages qui suivent un schéma type de circulation susceptible d'évoluer en fonction de la variation des conditions environnementales (houles et vents).

3.2.1. Circulation dans le lagon de Taunua

Deux études effectuées par le C.E.A. (LESE) rapportent une série de mesures des courants dans le lagon de Taunua et dans la baie de Taunua.

Le premier rapport (FRAIZIER, 1980) consiste en une étude réalisée entre décembre 1979 et mars 1980. 500 mesures de courant ont été effectuées entre le port de Fare Ute et la passe de Taunua à l'aide d'un courantomètre portatif. On remarque que dans l'ensemble, la vitesse des courants des masses d'eaux superficielles, dans le chenal de Taunua, est relativement faible ($V_{\max} = 0,40 \text{ m.s}^{-1}$) et qu'en règle générale, les eaux ont tendance à se déplacer de l'Ouest vers l'Est, avec cependant des inversions périodiques du courant sous le pont de Fare Ute.

Dans la baie de Taunoa, la circulation est plutôt circulaire avec deux alimentations : l'une provenant du chenal de Taunoa et l'autre ayant pour origine l'eau du lagon d'Arue situé à l'Est de la baie.

La deuxième étude précise les données précédentes (de NARDI et al., 1983). Les mesures ont eu lieu au cours des deux saisons principales :

- saison sèche (juin - novembre) où le temps est calme avec faibles précipitations - vent moyen à faible - peu de houle,

- saison de pluies (décembre - mai) durant laquelle le temps est agité, accompagné de grains violents et de fortes pluies - houle parfois forte.

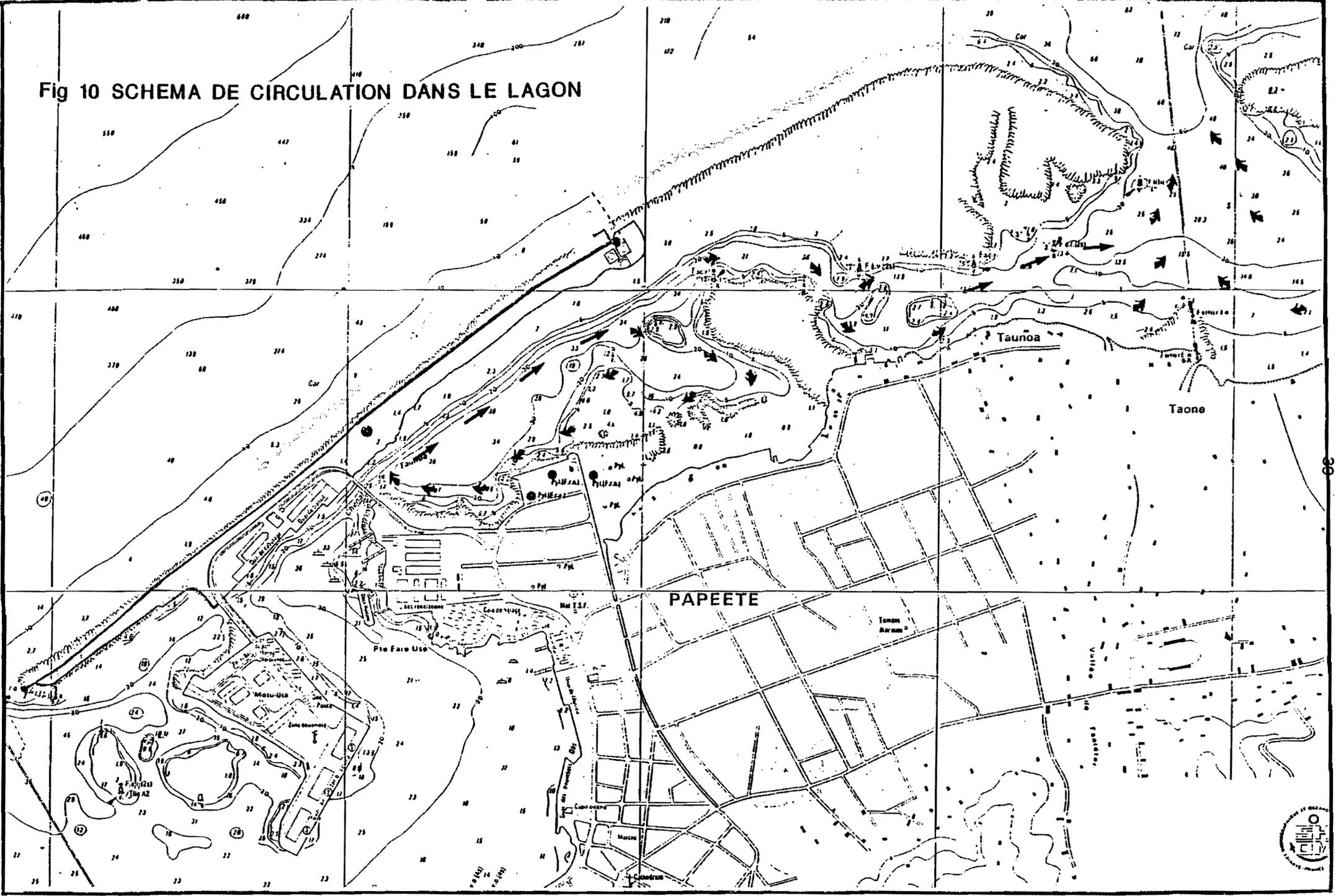
Les mesures ont été effectuées à l'aide de courantomètres enregistreurs et la durée des mesures a été de 1 mois environ pour chaque saison étudiée.

Les résultats obtenus confirment les conclusions obtenues par FRAIZIER (1980). Les figures 10 et 11 illustrent les données recueillies sous le port de Fare Ute ainsi que dans le chenal de Taunoa pour les deux conditions de mesure.

	JANVIER 1981			JUILLET 1981		
	CAP	V _{max}	V _{moy.}	CAP	V _{max}	V _{moy.}
Fare Ute	35° - 60°	1.0 m.s ⁻¹	0.35 m.s ⁻¹	25° - 55° (55% mesures)	0.84 m.s ⁻¹	0.24 m.s ⁻¹
				205° - 225° (36% mesures)		0.17 m.s ⁻¹
Chenal de Taunoa	20° - 90°	0.40 m.s ⁻¹	0,11 m.s ⁻¹	35° - 115° (80,5% mesures)	0.26 m.s ⁻¹	0.07 m.s ⁻¹
				215° - 295° (14% mesures)		

Tableau 5 : Cap et vitesse des courants dans le lagon.

Fig 10 SCHEMA DE CIRCULATION DANS LE LAGON



3.2.2. Schéma général de la circulation des eaux superficielles dans le lagon de Taunoa

L'ensemble des résultats exposés ci-dessus conduit à envisager deux modes de circulation dans le lagon, selon que l'on se trouve en été ou en période de conditions météorologiques calmes (hiver austral) ou, au contraire, en période de conditions météorologiques agitées (été austral).

Par temps calme :

Au cours de la saison sèche, le sens des courants peut s'inverser sous le pont de Fare Ute, le chenal de Taunoa alimentant ainsi le port de Papeete. Cette circulation vers le Sud-Ouest est observable pendant 36 % du temps. Le reste du temps, les eaux s'écoulent vers l'Est et se dirigent vers la passe de Taunoa. La vidange du lagon s'effectue par la passe de Taunoa, mais il faut remarquer que c'est un phénomène très lent, à cette époque de l'année, car le remplissage lagonaire par les houles est très faible.

Durant la saison des pluies :

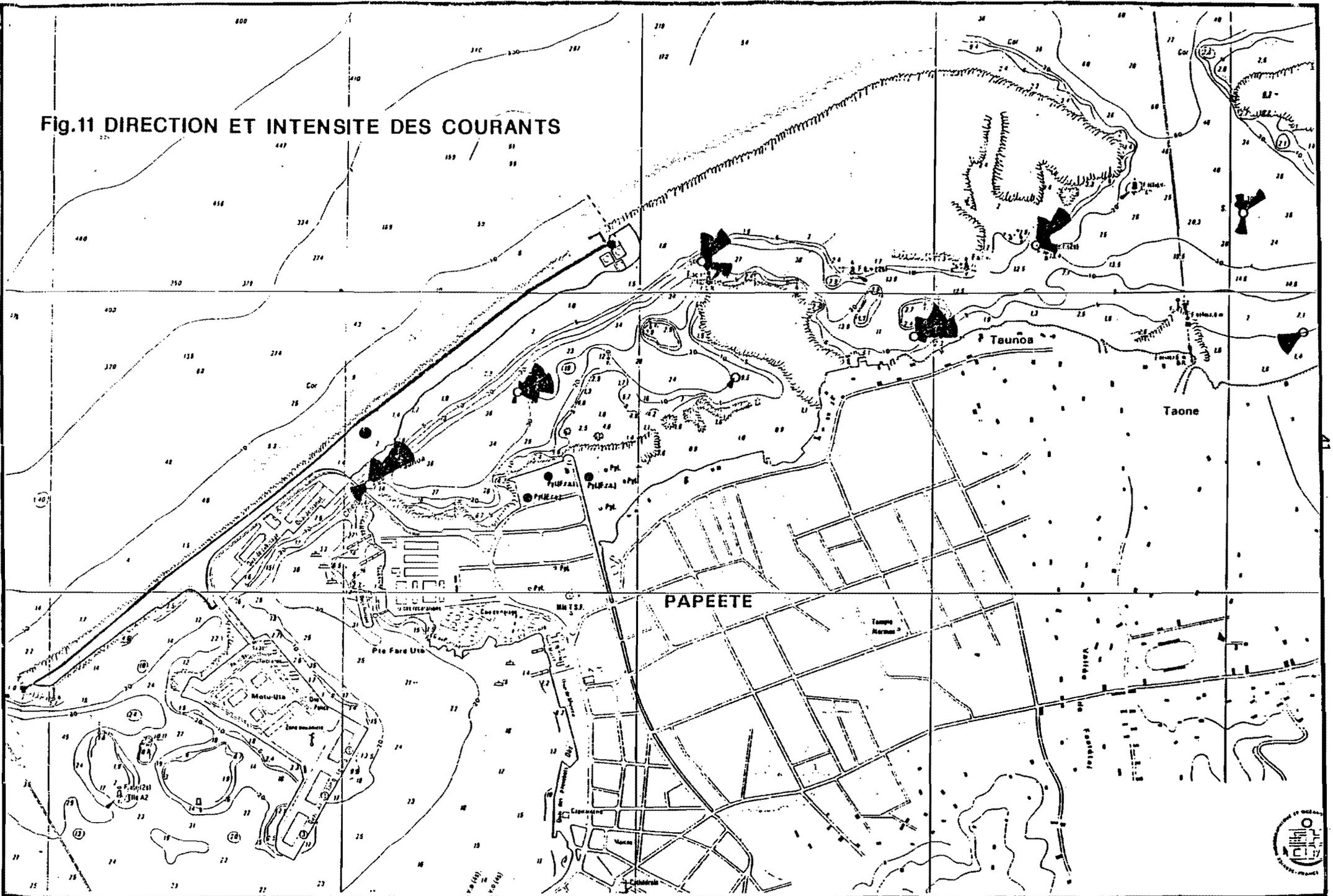
Au cours de cette période, la houle est souvent importante, et durant le mois de janvier 1981 on a noté 30 évènements de houle supérieure à 2 m d'amplitude. Cette houle apporte de l'eau dans le lagon qui se remplit. Au niveau du pont de Fare Ute, on peut observer une circulation à deux couches. L'une d'entre-elles, profonde, s'écoule de façon continue vers l'Est, alors que la couche supérieure peut présenter temporairement des inversions de sens, probablement sous l'effet de l'action du vent. L'évacuation des eaux se fait par la passe de Taunoa.

3.2.3. La circulation dans la passe de Taunoa

L'étude de la circulation dans la passe de Taunoa a été réalisée par le C.E.T.E. d'Aix en Provence (PORCHER, 1986). Deux types de mesures ont été effectués :

- des mesures de la circulation lagrangienne consistant à suivre les courants de surface à l'aide de traceurs colorés (rhodamine B) et de flotteurs à drogues,

Fig.11 DIRECTION ET INTENSITE DES COURANTS



- des mesures de la circulation eulérienne effectuées à l'aide de deux courantographes mouillés respectivement à - 5 mètres et - 60 mètres sur les fonds de 70 mètres.

Résultats :

- circulation lagrangienne (figure 12) : les courants de surface à la sortie de la passe de Taunoa sont sous l'influence directe du jet de la passe dont la puissance est fonction de l'importance de la vidange liée notamment aux apports des houles qui déferlent sur le récif.

A la sortie de la passe, les courants de surface portent vers le large jusqu'à une distance variable comprise entre 200 et 1200 mètres. Les vitesses mesurées ne sont pas très élevées et généralement comprises entre 0,10 et 0,25 m.s⁻¹. Le matin, avant que le vent ne se lève, le courant porte très au large, puis en début d'après-midi, quand le vent est bien établi, les courants sortants infléchissent leur direction vers l'Ouest.

- circulation eulérienne (figure 13) : de même que dans l'étude décrite précédemment (de NARDI, 1983), les mesures courantologiques ont été effectuées durant des périodes correspondant à la saison sèche et à la saison des pluies.

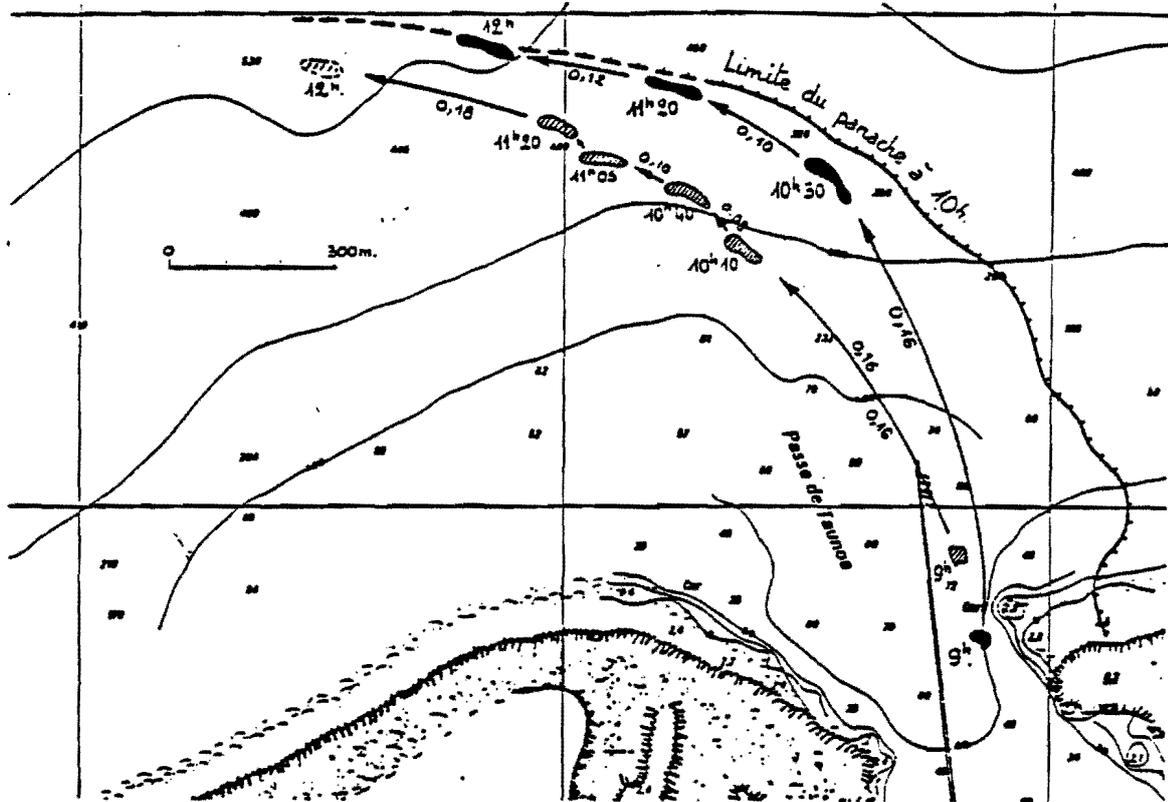
Les principaux résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau page suivante. A l'examen du tableau 6 et des diagrammes de dispersion (figure 13) on constate qu'à profondeur égale et d'une campagne à l'autre, il y a concordance des directions de courants.

Les courants proches de la surface subissent l'influence de la circulation parallèle à la côte qui se produit sur la pente externe récifale. Les courants sortant de la passe présentent donc une inflexion vers le Nord - Ouest. C'est d'ailleurs ce qui avait été observé dans les mesures lagrangiennes.

En surface, les courants rentrants sont peu fréquents, à l'inverse de ce qui se passe en profondeur.

En ce qui concerne les vitesses, on remarque qu'elles sont assez importantes à la sortie de la passe, avec des valeurs légèrement supérieures lors de la deuxième campagne. Près de la surface, les vitesses les plus fortes sont produites par les courants sortants ; en profondeur,

Fig.12 : Matin - Trajectoire et vitesse des traçeurs colorés le 29 Août au large de la passe de TAUNOA.



in CETE 1986

Après-midi

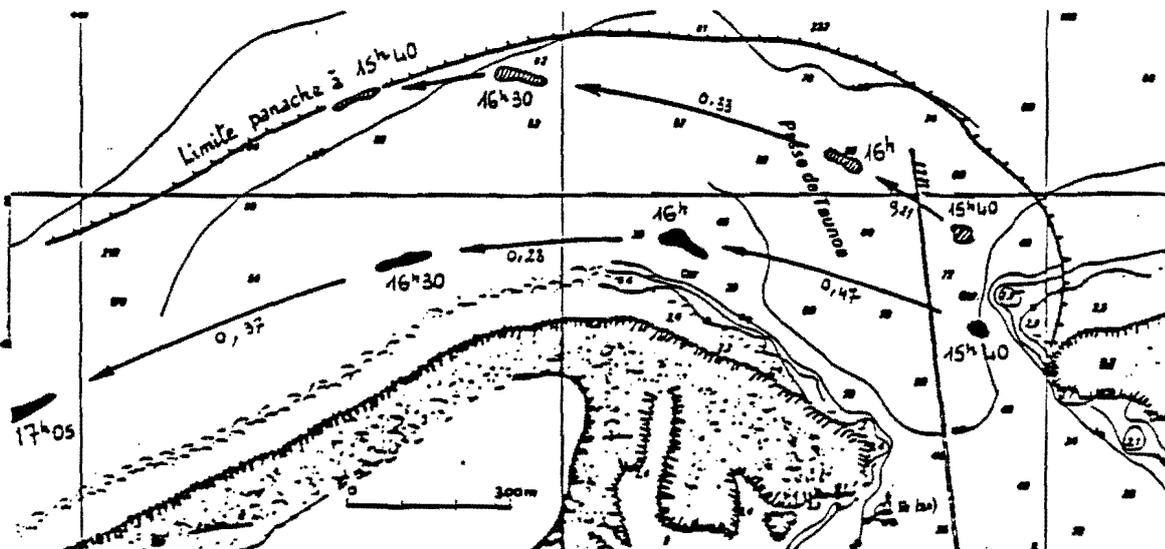
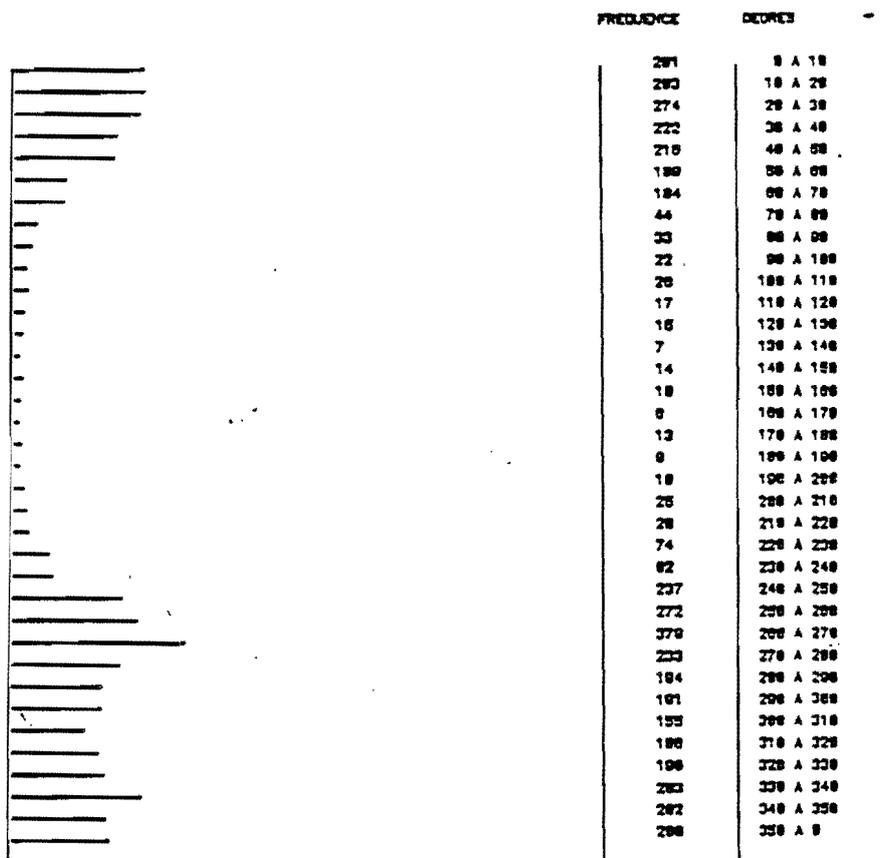


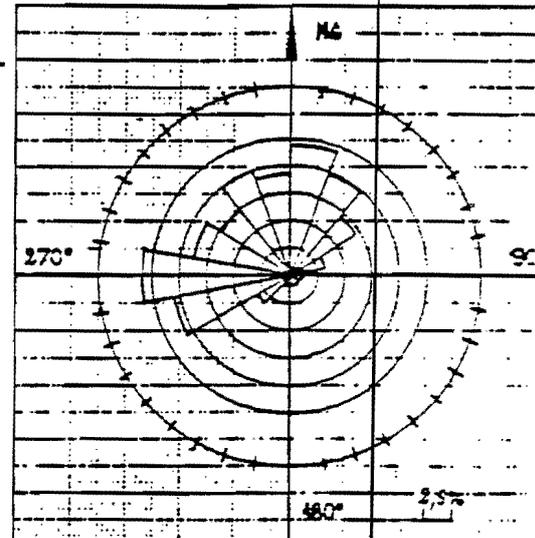
Fig 13 : ⁴⁴Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des courants a la STATION I par - 5 mètres de profondeur.
 Courantographe C1 (N° 5930) : Période du 19 Septembre 1984 au 22 Octobre 1983.



a. Histogramme des caps courants

SECTEUR DE 20°	%	SECTEUR DE 20°	%
0 à 20°	12,1	181 à 200°	0,5
21 à 40°	10,5	201 à 220°	1,1
41 à 60°	6,9	221 à 240°	3,3
61 à 80°	3,2	241 à 260°	10,9
81 à 100°	1,2	261 à 280°	13,1
101 à 120°	0,9	281 à 300°	8,2
121 à 140°	0,5	301 à 320°	7,3
141 à 160°	0,5	321 à 340°	10,3
161 à 180°	0,4	341 à 360°	8,7

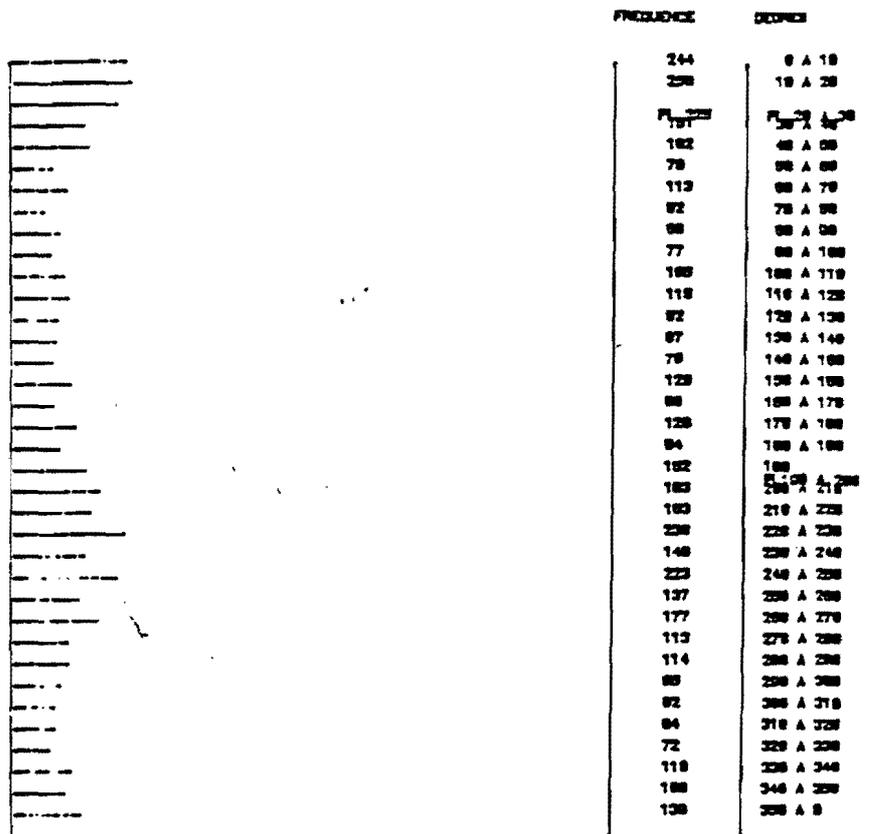
b. Fréquence des caps courants par secteur de 20°



c. Rose des caps courants

Fig.14 : Tableau récapitulatif des principales caractéristiques des courants à la STATION I par - 60 mètres de fond

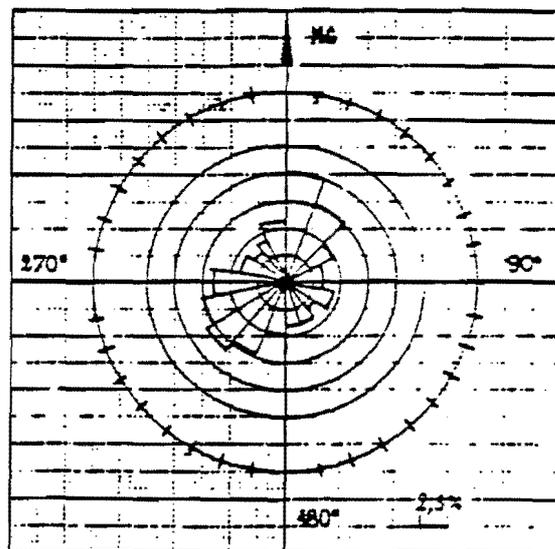
Courantographe C2 (N° 5929)



a. Histogramme des caps courants.

SECTEUR DE 20°	%	SECTEUR DE 20°	%
0 à 20°	10,6	181 à 200°	5,2
21 à 40°	8	201 à 220°	7,3
41 à 60°	5,1	221 à 240°	8,3
61 à 80°	3,7	241 à 260°	7,6
81 à 100°	3,7	261 à 280°	6,2
101 à 120°	4,6	281 à 300°	4,5
121 à 140°	3,8	301 à 320°	3,5
141 à 160°	4,2	321 à 340°	4
161 à 180°	4,4	341 à 360°	5,2

b. Fréquence des caps par secteur de 20°



c. Rose des caps courants

Profondeur	Campagne du 19/09/84-22/10.84	Campagne du 18/02/84-19/03/84
- 5 mètres	<p><u>Caps courants</u> : secteur 220° à 80° (95 %)</p> <p><u>Vitesses</u> :</p> <p>Vitesses dominantes : $0,1 < V < 0,3$ m/s Vitesse moyenne : 0,2 m/s Vitesse maximale : 0,6 m/s Vitesse très forte : dans l'axe des alizés => vers Ouest à Sud-Ouest Vitesse rentrant < 0,3 m/s</p>	<p><u>Caps courants</u> : Secteur 220° à 80° (93,5 %)</p> <p><u>Vitesses</u> :</p> <p>Vitesses dominantes : $0,2 < V < 0,5$ m/s Vitesse moyenne 0,3 à 0,4 m/s Vitesse maximale > 0,6 m/s Vitesse très forte vers le large et dans l'axe des alizés vers Ouest à Sud-Ouest Vitesse rentrant très faible $V \ll 0,1$ m/s</p>
- 60 mètres	<p><u>Caps courants</u> :</p> <p>- secteur 340° à 60° (29 %) - secteur 180° à 280° (34,5 %)</p> <p><u>Vitesses</u> :</p> <p>Vitesses dominantes : $V < 0,2$ m/s Vitesse moyenne : 0,1 m/s</p> <p>Vitesse maximale : 0,5 m/s Vitesses les plus fortes : vers le Sud-Ouest à Ouest Vitesse rentrant < 0,25 m/s</p>	<p><u>Caps courants</u> :</p> <p>- secteur 340° à 60° (39,9 %) - secteur 140° à 220° (26,2 %)</p> <p><u>Vitesses</u> :</p> <p>Vitesses dominantes : $V < 0,2$ m/s Vitesse moyenne : entre 0,1 et 0,2 m/s Vitesse maximale : 0,5 m/s Vitesses les plus fortes : sortant vers le large et rentrant non négligeable 0,1 à 0,3 m/s Vitesse rentrant < 0,3 m/s</p>

Tableau 6 : Récapitulatif des principales caractéristiques des courants à la sortie de la passe de Taunoa.

l'intensité des courants est légèrement plus faible et les vitesses les plus importantes sont atteintes par des courants se dirigeant vers le Nord ou l'Ouest - Sud-Ouest.

Au cours de la deuxième campagne (septembre - octobre), le remplissage du lagon par une forte houle a conduit à la formation de forts courants de vidange ($V_{\max} > 0,60 \text{ m.s}^{-1}$). Les courants rentrants en surface sont rares, tandis qu'au fond ils se manifestent tant en fréquence qu'en intensité. Il est probable qu'il s'agisse là de la formation d'un courant de compensation permettant de compenser l'équilibre volumétrique du lagon.

3.2.4. Les courants superficiels sur la pente externe du récif barrière

Des séries temporelles de mesures courantologiques ont été réalisées au cours de la période s'étendant du mois de novembre 1982 au mois d'octobre 1985. Les interruptions de mesures peuvent correspondre soit à des incidents mécaniques subis par les appareils, soit à des périodes de relevage de lignes de mouillage destinées à recueillir des données enregistrées. L'ensemble des données brutes est rassemblé dans des recueils spéciaux (KESSLER et MONBET, 1984, 85 et 1987). La position des lignes de courantométrie ainsi que leurs caractéristiques sont présentées dans l'annexe 1 de ce volume.

Par ailleurs, un certain nombre de profils de courants a été effectué lors des mesures hydrologiques.

3.2.5. Les courants côtiers dans la couche d'eau superficielle (0 - 100 m)

Sur l'ensemble des mesures de courants recueillies dans la couche d'eau superficielle, on observe une certaine constance dans l'allure générale des courants, avec toutefois un certain nombre d'altérations au schéma général, dues à des oscillations parasites lors des conditions météorologiques défavorables.

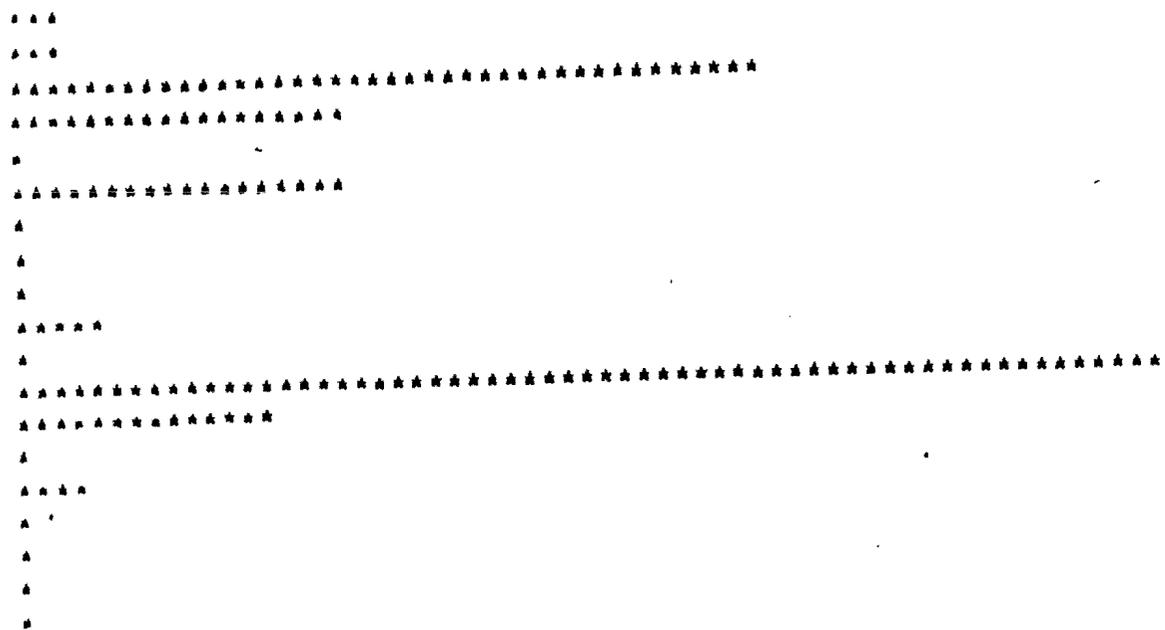
Direction des courants (figure 15)

En règle générale, les courants s'écoulent parallèlement à la côte. Le courant de flot est orienté dans la direction Nord - Est (50°) et le jusant dans la direction Sud - Ouest (230°). On note là l'influence de la côte sur le déplacement des masses d'eaux côtières.

Fig.15 DIRECTION DES COURANTS

DATA/ ET83-S163-4C / CAP

BAR PLOT



FREQUENCY	DEGRES-C
82	10.
106	30.
1561	50.
715	70.
23	90.
694	110.
1	130.
12	150.
0	170.
199	190.
35	210.
2390	230.
478	250.
13	270.
152	290.
1	310.
5	330.
0	350.
1	370.

TOTAL NUMBER OF INPUT DATA = 6466 WITH AVERAGE VALUE = 152.98 DEGRES-C

NUMBER OF DATA VALUES OUT OF RANGE = 0

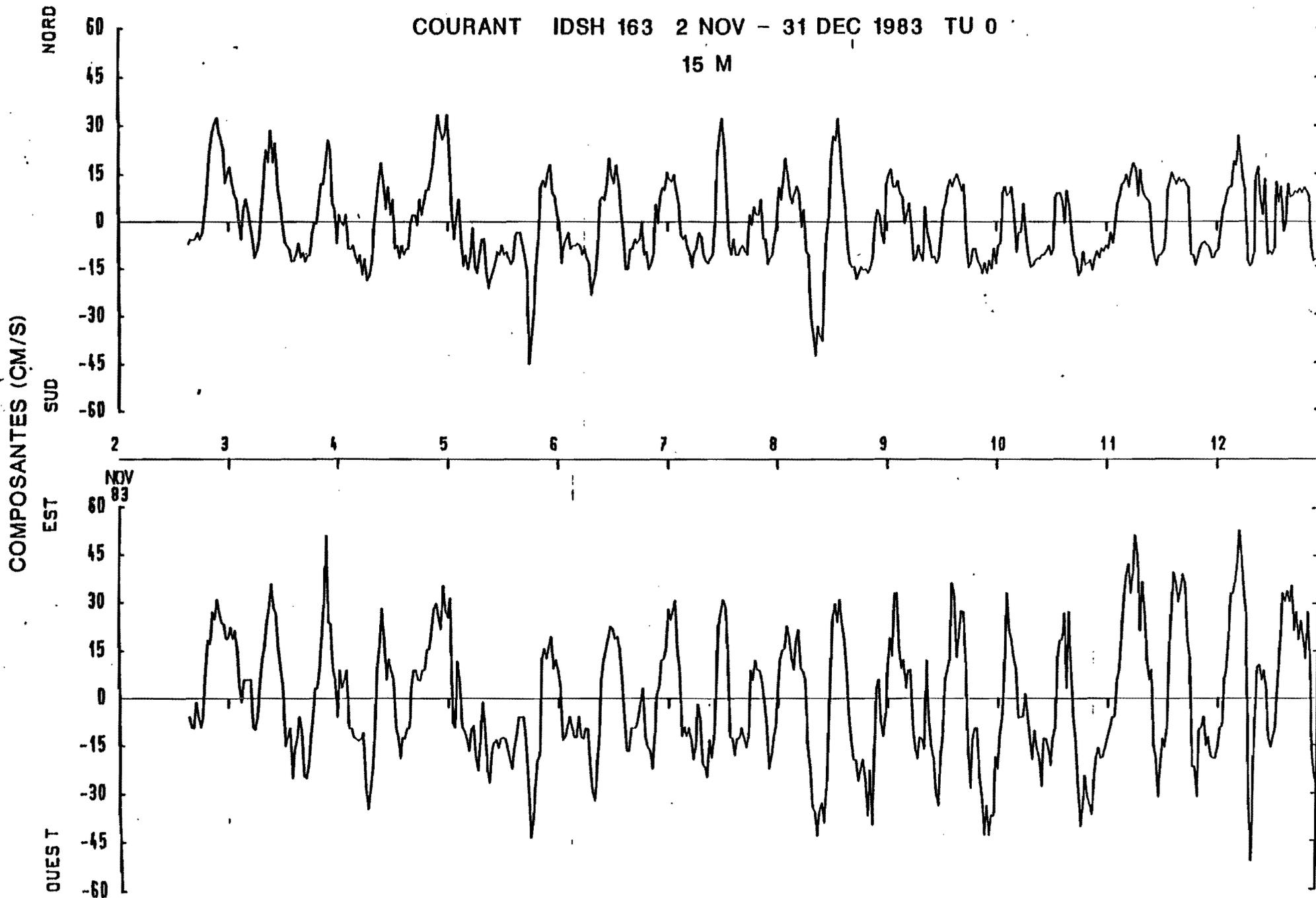
SPANNING RANGE

FROM 83- XI -02 15.25.00
 TO 84- III-16 07.55.00

Fig.16 VITESSES DES COURANTS DU 2 AU 12 NOVEMBRE 1985

COURANT IDSH 163 2 NOV - 31 DEC 1983 TU 0

15 M



ETM 83 / 84 4^e Campagne - Point 4 - Ligne 1 - C 163

Immersion : 15 m - Fond : 29,3 m - Cadence : 30'

MOYENNES ET EXTRÊMAS

PÉRIODE	1983		1984			MOYENNE	
	NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS		
IMMERSION	↳ 14	14	13	13	16 ←	14	
TEMPÉRAT.	MIN.	26,26	26,20	26,58	27,42	28,05	28,33
	MOY.	27,55	27,82	28,13	29,16	29,64	
	MAX.	28,28	28,62	28,99	30,07	30,34	
COURANTS	MIN.	3	3	3	3	3	16
	MOY.	21	20	16	12	8	
	MAX.	63	71	57	44	49	
NOMBRE DE MESURES	1363	1489	1489	1393	736	6466	

TABLEAU 7

ETM 83 - 2^{ème} Campagne - Point B.2 - Ligne 7 - C 163

Immersion : 15 m - Fond : 375 m - Cadence : 30 mm

MOYENNES ET EXTRÊMAS

PÉRIODE	1983				
	Mars	Avril	Mai	Juin	
IMMERSION	26 \leftarrow 14	20	21	23	\leftarrow 22
MIN	27,17	26,51	26,62	26,35	
TEMPÉRATURES MOY	27,38	26,87	26,98	26,88	
MAX	27,67	27,47	27,19	27,07	
	Nbre valeurs supprimées 3/25	139/1441	22/1488	20/1032	
MIN	4	4	4	4	
COURANTS MOY	44 (48)	40 (60)	25 (30)	25 (32)	
MAX	127	226	210	195	
	Nbre valeurs supprimées 7/25	179/1441	45/1488	45/1032	
CYCLONE		VEENA 12/04/83			

Dépassement de la capacité du courantographe

- Températures : les valeurs hors capacité ont été supprimées ce qui ne doit pas entacher la moyenne, ni la faible variabilité de la température.
- Courants : les valeurs hors capacité (160 cm/s) se traduisent par des zéros ; les valeurs moyennes sont donc minorées (valeurs moyen probables entre parenthèses) ; les valeurs maxi indiquées ont été réellement enregistrées et ne sont peut-être pas les limites supérieures.

TABLEAU 7bis

L'alternance flot et jusant est assez régulière, mais la durée de ces deux périodes de la marée est très variable et probablement soumise à l'influence des vents. La figure 16 illustre ce phénomène. La prévision de la direction des courants à un instant donné est donc difficile. L'histogramme de la figure 15 montre la répartition des fréquences des caps au cours de la période de mesure. On constate une légère prédominance des fréquences du cap dans la direction Sud - Ouest (45 % dans le secteur $210^{\circ} - 250^{\circ}$) contre 37 % dans le secteur $30^{\circ} - 70^{\circ}$.

Vitesse des courants

En dehors des conditions météorologiques exceptionnelles, les vitesses des courants dans la zone côtière sont dans l'ensemble assez modérées. Le tableau 7 récapitule les vitesses minima, moyennes et maxima à - 15 m au cours de la période comprise entre novembre 1983 et mars 1984.

On constate que la vitesse moyenne s'établit autour de $0,15$ à $0,20 \text{ m.s}^{-1}$ avec des pointes allant jusqu'à $0,70 \text{ m.s}^{-1}$.

La deuxième campagne de mesures (tableau 7^b) s'est déroulée durant une période de forte activité cyclonique. Au cours du passage du cyclone Veena sur le site étudié, les valeurs maxima de vitesse des courants ont atteint $2,26 \text{ m.s}^{-1}$ à 15 m de profondeur. A -100 m le maximum de vitesse enregistré n'a pas dépassé $0,60 \text{ m.s}^{-1}$.

Le CETE d'Aix (PORCHER, 1986) a également effectué des mesures de courant sur la pente externe récifale à -5 m et -60 m. L'ensemble des conclusions de ce rapport corroborent les résultats obtenus lors de l'étude de site E.T.M.

En résumé, la circulation des masses d'eaux superficielles à l'extérieur du lagon se schématise de la façon suivante :

Des courants alternatifs de période sensiblement semi diurne balayent le platier récifal, dans une direction sensiblement parallèle à la côte. On observe généralement une légère dominante des courants de jusant (secteur $210^{\circ} - 230^{\circ}$).

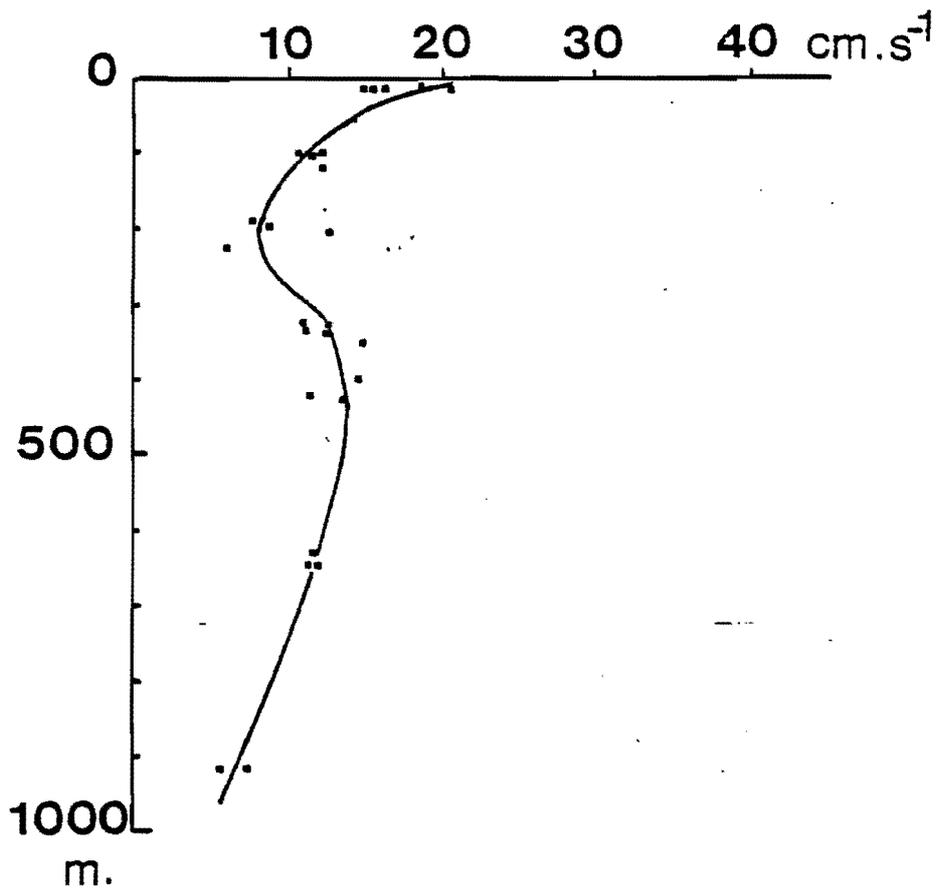
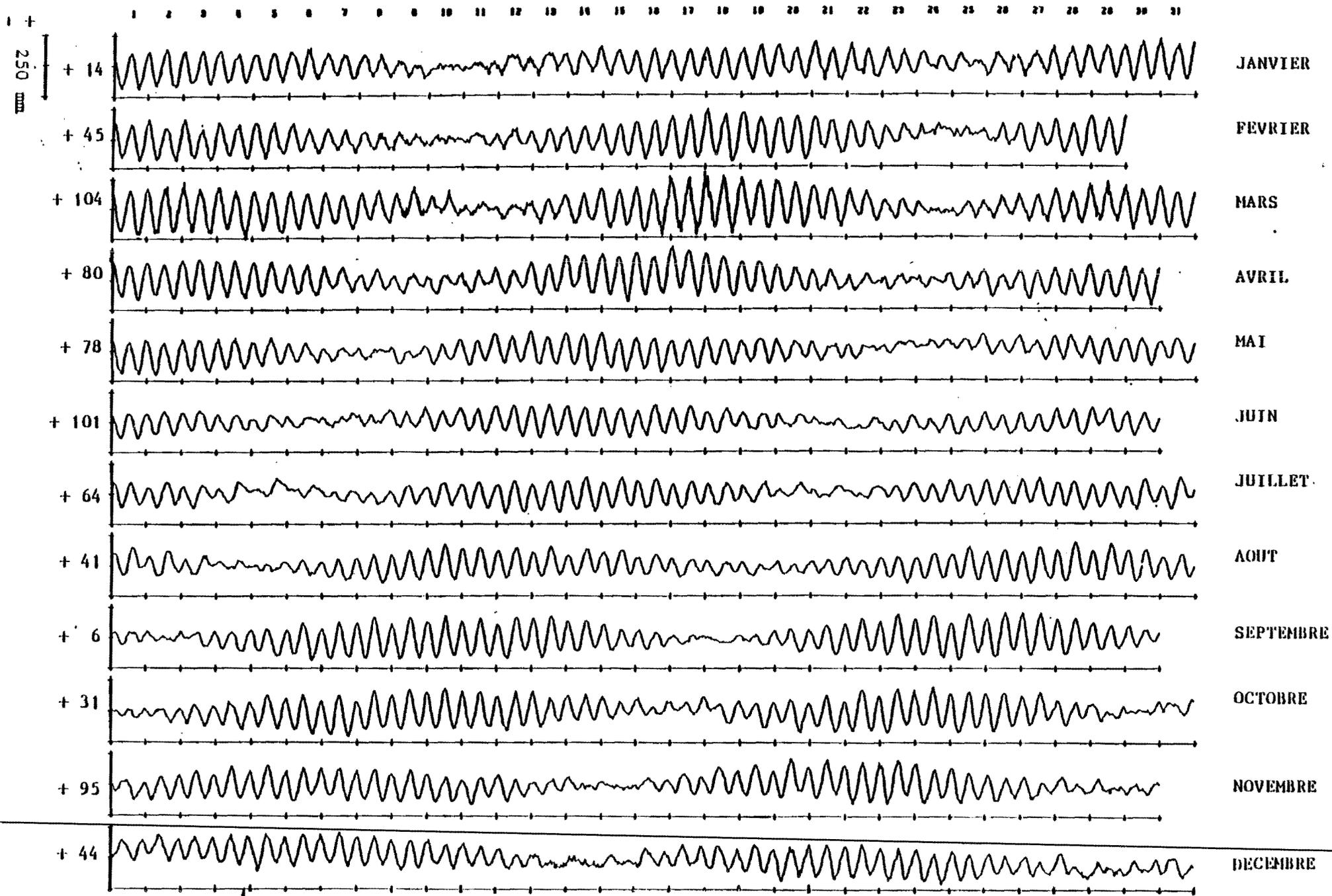


Fig.17 PROFIL VERTICAL DES VITESSES DE COURANTS
ENTRE 0 ET 1000 M (V.moyenne)

Fig.18 COURBES DE MAREES
1984



Les vitesses moyennes sont modérées ($0,15 - 0,20 \text{ m.s}^{-1}$) et les vitesses maxima n'atteignent pas 1 m.s^{-1} . En période de cyclone, la vitesse maximum enregistrée a atteint $2,26 \text{ m.s}^{-1}$. La couche 0 - 100 m est à peu près homogène en ce qui concerne la direction des courants. On note toutefois une diminution sensible des vitesses moyennes avec la profondeur ($0,10 \text{ m.s}^{-1}$ à 100 m) (figure 17).

Il convient de noter, en outre, que bien que l'alternance morte eau - vive eau soit bien visible sur les marégrammes (figure 18), on ne constate pas de corrélation entre la vitesse des courants et l'amplitude de la marée.

Altération des courants

A certaines périodes, et pendant une durée variable qui peut aller de quelques heures à plusieurs jours, on peut observer des altérations sensibles du schéma courantologique présenté précédemment.

Sous l'influence probable des conditions météorologiques locales ou lointaines, des perturbations de courant de marée apparaissent. Un exemple en est fourni par la figure 19 qui montre deux aspects assez fréquents de ces altérations (enregistrement - 15 m, novembre 1983).

Dans la journée du 5 au 6 novembre, les courants de jusant s'établissent vers 3 heures du matin, et ils persistent dans cette direction jusqu'à 20 heures, soit un jusant établi pendant une période de 17 heures environ.

Un deuxième type d'altération est présenté dans la partie droite de la figure 19 et intéresse la période du 26 au 30 novembre 1983. Cette figure fait apparaître des oscillations des courants non plus semi diurnes comme c'est habituellement le cas, mais au contraire des oscillations de période voisine de 40 heures, période qui est proche des oscillations d'inertie au lieu considéré (latitude 17°S).

Enfin, un dernier type d'altération des courants peut être observé lorsqu'on réalise des mesures à l'aide d'un profileur de courant. La figure est une illustration de la vitesse et de la direction des courants mesurés sur la verticale entre 0 et 600 mètres. Deux phénomènes remarquables peuvent y être observés :

Fig.19 VITESSES DES COURANTS A 15 METRES MONTRANT L'ALTERNANCE
D'ONDES SEMI DIURNES ET D'ONDES DE 40H DE PERIODE

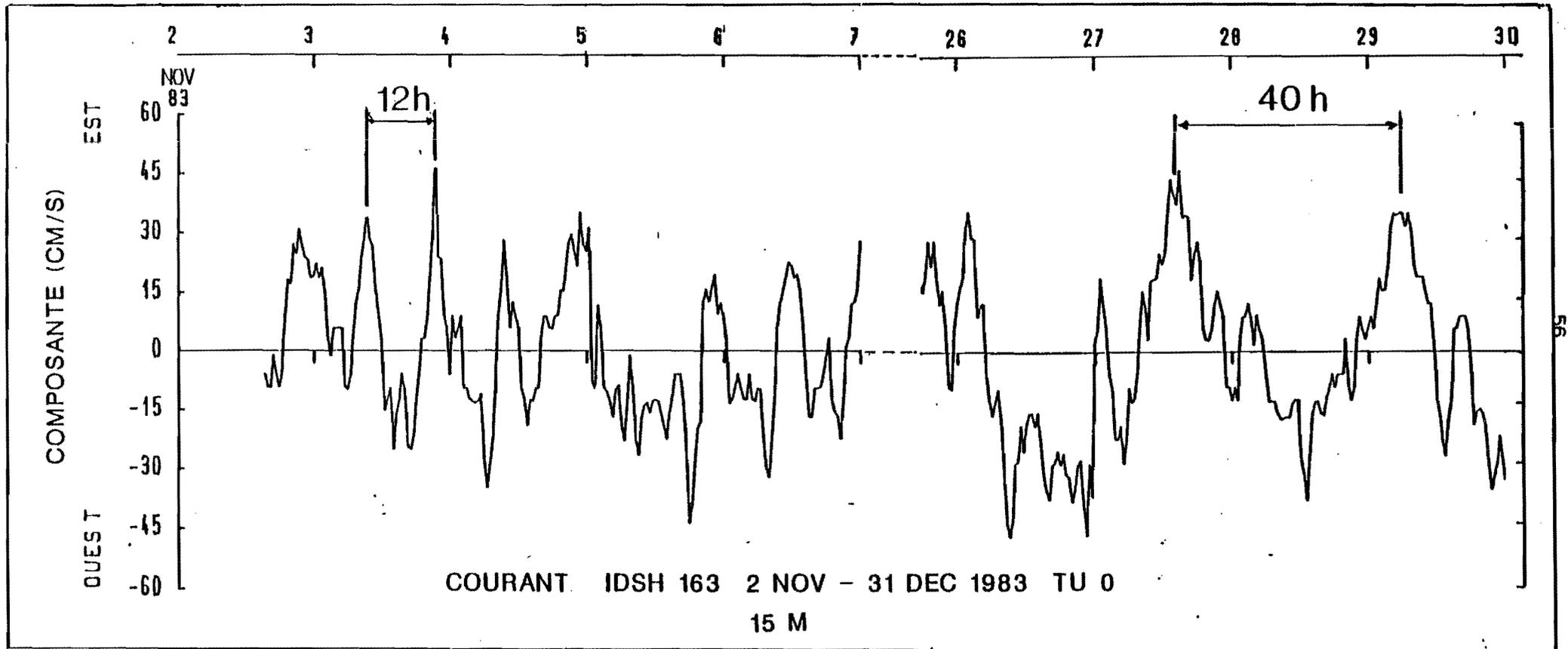
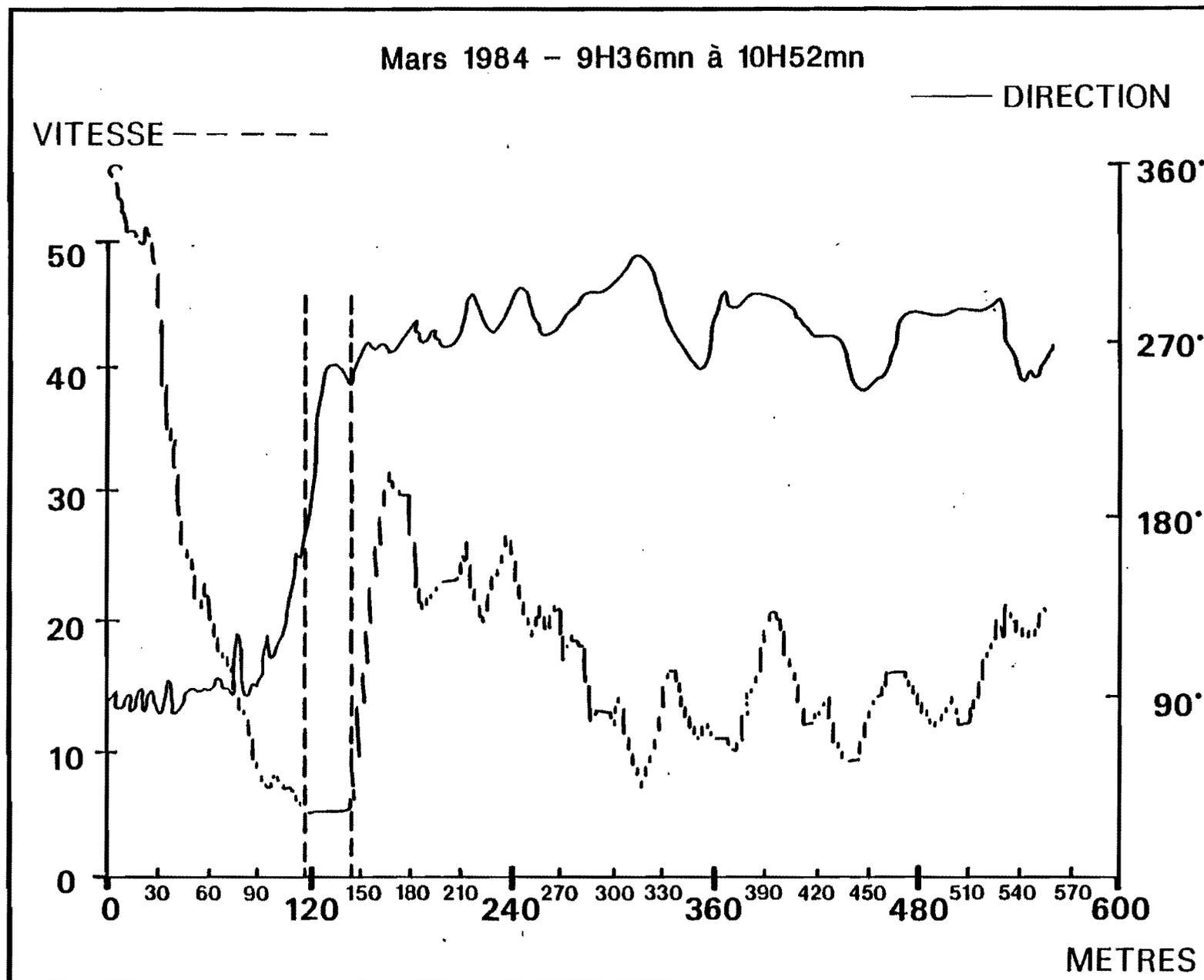


Fig.20 PROFILS DE VITESSE ET DIRECTION DES COURANTS



- une diminution importante de la vitesse des courants vers - 120 à 150 mètres,

- une inversion concomitante de la direction des courants à la même profondeur.

Cette structure verticale des courants est liée à la présence d'ondes internes dont la description figure au paragraphe 4.1.3.

4. CARACTERISTIQUES HYDROLOGIQUES

4.1. Température de l'eau

4.1.1. Température de l'eau du lagon

Dans le lagon de Taunoa, on ne dispose pas de mesures de températures de longue durée, comme c'est le cas pour la pente externe récifale.

Les données de température présentées ici, proviennent de mesures effectuées par RENON (1978) dans le lagon de Faaa.

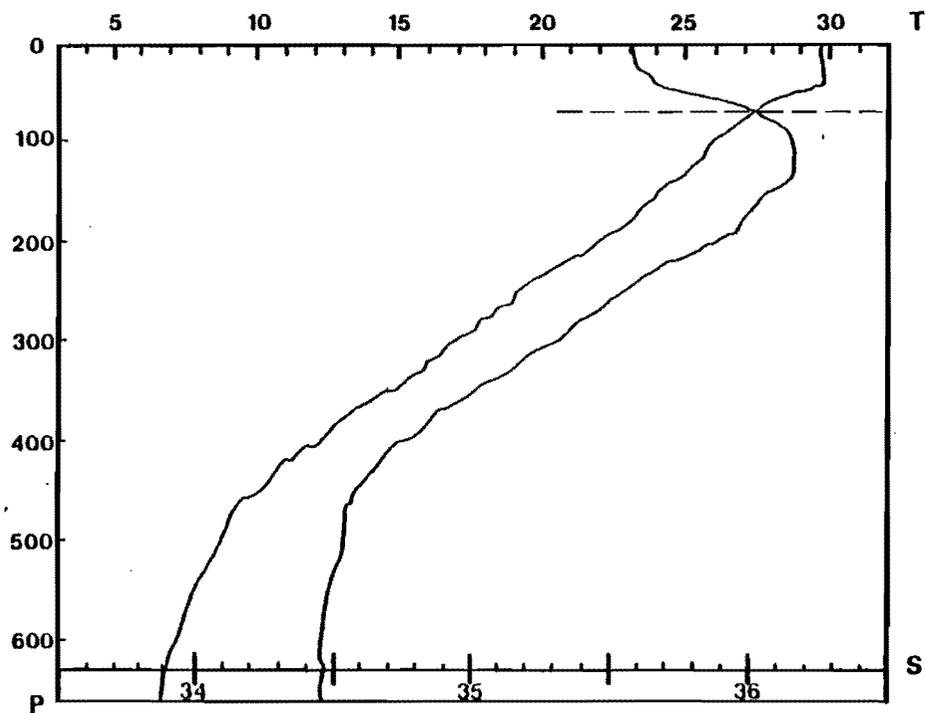
Selon cet auteur, les températures les plus basses (26,5°C) ont été relevées en août et septembre, et les plus élevées (29,4°C) de janvier à avril. Des températures supérieures à 30°C ont toutefois pu être enregistrées à la surface du lagon. Toujours d'après RENON (1978) qui cite GUILCHER et al. (1969), les eaux du lagon sont légèrement plus fraîches en hiver et plus chaudes en été que celles de l'océan. Ce phénomène ne ressort cependant pas nettement sur la figure 6 où ont été portées simultanément les variations annuelles de la température de l'eau du lagon, celles de l'océan de mer ainsi que celles de l'air. Au cours de la journée, la température de l'eau peut varier d'environ 1°C dans la couche de surface et de 0,5°C en profondeur.

4.1.2. Température de l'eau sur la pente externe

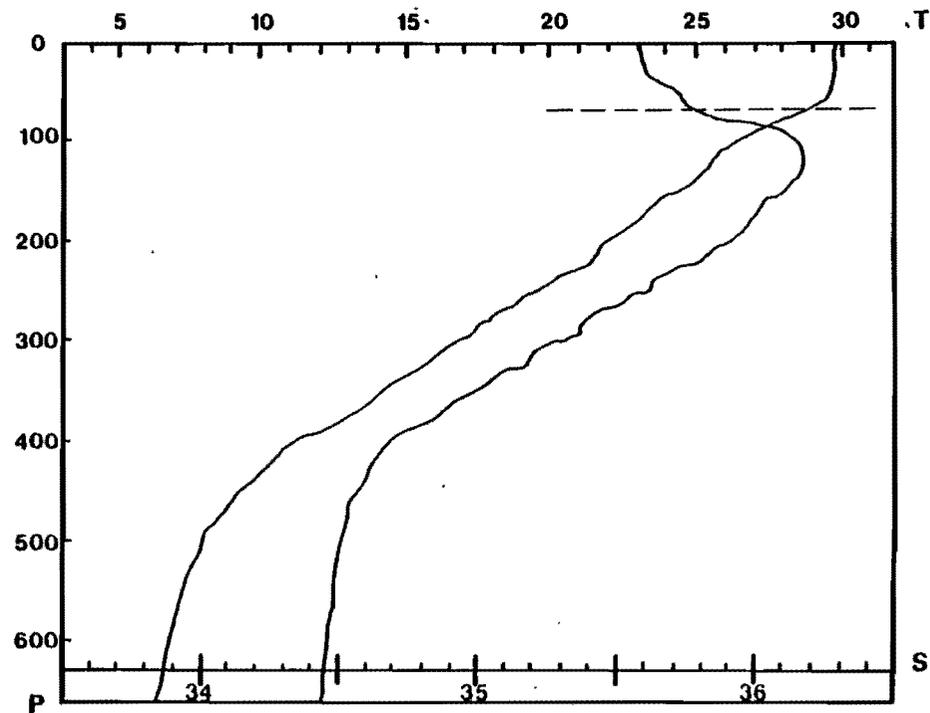
Sur la pente externe, on dispose de nombreuses mesures de températures grâce aux capteurs de température dont sont équipés les courantomètres ainsi que grâce à l'immersion de chaînes de thermistances capables de mesurer les variations thermiques de la masse d'eau tous les 10 mètres sur une tranche d'eau de 100 mètres d'épaisseur.

Fig.21 PROFIL DE TEMPERATURE ET DE DENSITE A 1H30 D'INTERVALLE

(Noter l'approfondissement de la couche homogene)



ETM St N 001 DATE:19.03.84 HEURE:10h LAT:17.29S LONG:149.36W



ETM St N 002 DATE:19.03.84. HEURE:11h22 LAT:17.29S LONG:149.36W

TEMPERATURE DE L'EAU

Fluctuations normales saisonnières moyennes des eaux de surface

Immersion	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
20	27,11	28,38	28,56	28,53	27,87	26,97	26,59	25,89	26,49	26,27	27,18	26,86	27,22

Fluctuations normales saisonnières moyennes des eaux de fond

Immersion	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Moyenne
600	6,48	6,51	6,44	6,42	6,30	6,39	6,87	6,55	6,72	6,35	6,34	6,50	6,49
*	6,47		6,31*	6,36*	6,25*			6,50*	6,81*	6,34*		6,67*	6,485*
700	5,59	5,62	5,49	5,51	5,46	5,54	5,83	5,58	5,77	5,54	5,50	5,71	5,59
800	4,92	4,95	4,865	4,87	4,86	4,90	5,05	4,90	5,00	4,925	4,87	4,98	4,92
900	4,40	4,42	4,37	4,37	4,39	4,4	4,45	4,36	4,41	4,44	4,37	4,42	4,40
1.000	3,98	4,00	3,97	3,965	4	3,99	3,98	3,93	3,94	4,05	3,965	3,975	3,98
1.100	3,64	3,65	3,65	3,63	3,68	3,66	3,59	3,58	3,56	3,72	3,63	3,61	3,63
1.200	3,35	3,36	3,37	3,35	3,42	3,38	3,27	3,28	3,24	3,45	3,35	3,30	3,34
Courbe régression $T^{\circ}C = a(I_m)^b$	a = 2843,0544 b = 0,9512	a = 2918,5003 b = 0,9544	a = 2060,5277 b = 0,9049	a = 2349,61 b = 0,9243	a = 1643,2135 b = 0,8711	a = 2276,8624 b = 0,9187	a = 6500,50 b = 1,0711	a = 3551,96 b = 0,9854	a = 6412,826 b = 1,0705	a = 1751,3322 b = 0,8787	a = 2280,0779 b = 0,9199	a = 4395,1043 b = 1,0146	a = 2950,1029 b = 0,9568
	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =	a = b =

* Valeurs calculées si différentes.

TABLEAU 8

4.1.2.1. Profil vertical des températures

Le profil des températures en fonction de la profondeur se décompose de la façon suivante (mois de mars 1984) (figure 21) :

- entre la surface et - 50 m environ, on observe une couche homogène dont la température est de $29,6^{\circ}\text{C}$. L'épaisseur de cette couche homogène est bien entendu variable selon l'époque de l'année,

- entre - 50 et - 500 m, la température de l'eau décroît progressivement pour former une thermocline dont le t est égal à $18,2^{\circ}\text{C}$, soit $0,04^{\circ}\text{C}$ par mètre,

- enfin, au-delà de 500 m de profondeur, la température décroît lentement pour atteindre $4,06^{\circ}\text{C}$ à 1000 m de profondeur ($t = 4,96$ soit $0,0099^{\circ}\text{C}$ par mètre).

- les variations de la température moyenne en fonction de la profondeur sont présentées sur la figure 22.

4.1.2.2. Variations saisonnières (tableau 8)

Les variations des températures moyennes mensuelles au cours de l'année, à - 15 m de profondeur, comparées à celles de l'air, montrent beaucoup de similitude (figure 6). La température la plus chaude est observée au mois de mars ($28,56^{\circ}\text{C}$) en même temps que celle de l'air ($26,9^{\circ}\text{C}$). De même, il y a concordance des températures les plus froides de l'air et de la mer au cours du mois d'août ($24,35^{\circ}\text{C}$ et $25,89^{\circ}\text{C}$ respectivement). L'écart thermique entre la température moyenne la plus chaude et la température la plus froide est de $2,29^{\circ}\text{C}$ pour l'eau de mer superficielle. Cet écart diminue avec la profondeur pour atteindre $0,57^{\circ}\text{C}$ à 600 m et $0,09^{\circ}\text{C}$ à 1000 m.

4.1.2.3. Valeurs minima et maxima (tableau 9)

Le tableau 9 décrit les fluctuations des températures minima et maxima au cours de l'année. Dans la couche superficielle de 0 à 50 m, on

TEMPERATURE DE L'EAU

VALEURS MOYENNES

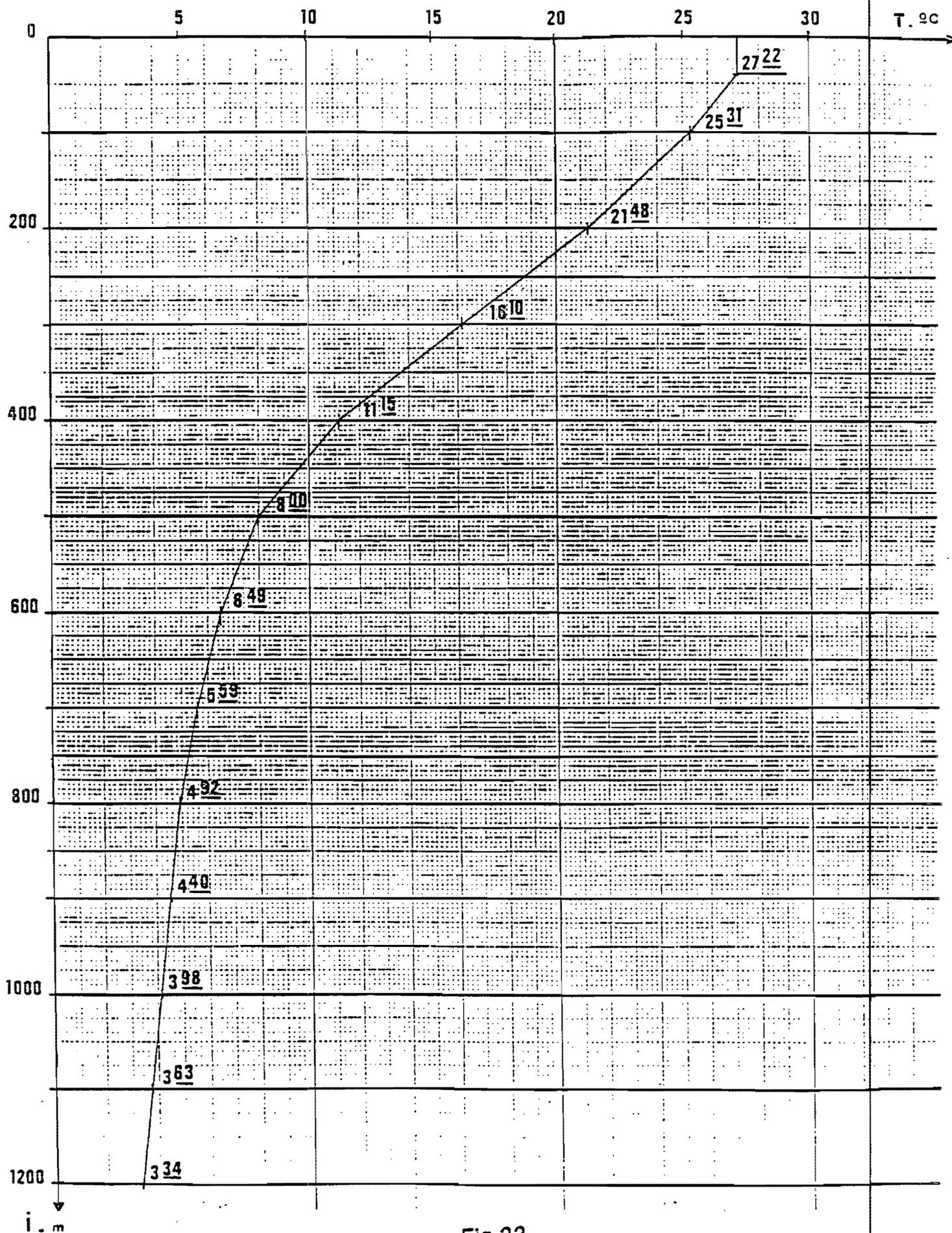


Fig.22

TEMPERATURE DE L'EAU

Fluctuations normales saisonnières min. et max.

	0 à 25	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1 000	1 100	1 200
mini	24.86	24.91	23	18.19	12.01	7.41	7.24	6.10	5.20	4.88	3.70	3.37	3.24	3.12
maxi	29.88	29,80	27.27	23.40	18.55	14.59	12.95	7.63	6.36	5.66	5.12	4.49	4.09	3.77
Variation	5,02	4,89	4,27	5,21	6,54	7,18	5,71	1,53	1,16	0,78	1,42	1,12	0,85	0,65

Valeurs extrêmes de sauvegarde : sans objet

TABLEAU 9

remarque des écarts de température de l'ordre de 5°C dus aux variations climatiques saisonnières. En revanche, à 400 m, on note un écart maximum de 7,18°C dû en grande partie à des perturbations de la structure thermique de l'océan, provoquées par la présence d'ondes internes.

4.1.3. Les ondes internes et variations thermiques (CAVANIE, 1983 ; DAMY, 1983)

Dans un fluide stratifié sous l'influence d'un champ de gravité, un ensemble complexe d'ondes peut être créé par différentes sollicitations. Ces ondes libres sont appelées ondes internes car, contrairement aux ondes de surface, les déplacements des particules fluides atteignent leur maxima à l'intérieur du fluide et non pas à la surface libre. La pulsation (2 fois la fréquence) de ces ondes est limitée vers le haut par la fréquence de Väisala, N :

$$N = \sqrt{-g \left(\frac{d\rho}{dz} \right) / \bar{\rho}}$$

où ρ est la masse spécifique au repos, fonction de la profondeur, z , et g l'accélération de la gravité. Dans l'océan, la force de Coriolis modifie les ondes internes lorsque leurs pulsations approchent de la pulsation d'inertie $f = \Omega \sin \phi$, où Ω est égal à deux fois la vitesse de rotation de la terre et ϕ est la latitude du lieu. La mise en équation montre que seules des ondes internes de pulsations supérieures à f peuvent se propager librement.

Les ondes dont l'influence sur les courants va être étudiée dans ce chapitre ont donc des pulsations ω telles que :

$$f < \omega < N$$

Aux latitudes moyennes et dans les conditions de stratification habituelles, ce domaine de pulsations correspond à des périodes allant de quelques minutes à une vingtaine d'heures.

Les premières observations d'ondes internes dans l'océan remontent au début du siècle (HELLAND-HANSEN et NANSEN, 1909), mais ce n'est que dans les vingt dernières années que des mesures de courant faites sur de longues périodes dans des régions très variées et à différentes profondeurs ont montré la présence quasi inévitable de ces ondes.

La liste des mécanismes apportant de l'énergie au champ d'ondes internes est assez diverse. Entre autres, il faut citer l'action :

- du vent sur les couches de surface,
- des courants de marée sur le relief sous-marin,
- de la turbulence créée par les grands courants océaniques,
- de la turbulence dans la couche de surface,
- des interactions non-linéaires entre vagues de vent et ondes internes.

Les enregistrements en continu de la température de l'eau de mer montrent une forte augmentation des variations journalières vers la profondeur (figure 23 et tableau 10).

Ces oscillations sont vraisemblablement liées à la présence d'ondes internes, ou marées internes puisque dans le cas examiné leur période est identique à celle de la marée externe (12h30) (figure 18). L'analyse de ces phénomènes s'appuie sur l'examen de la structure en densité de la tranche d'eau. La limite inférieure de la couche d'eau intermédiaire semble jouer un rôle d'écran thermique : en effet, le Δt moyen reste quasi constant durant l'année jusqu'à 400 m de profondeur alors qu'au delà de 500 m il présente des variations saisonnières importantes ; les réchauffements et refroidissements saisonniers intéressent donc surtout les 500 premiers mètres.

En revanche, cette limite inférieure de la couche d'eau intermédiaire ne semble jouer aucun rôle d'obstacle mécanique.

A 300 m (courantomètre 135) le 27/11/1982, l'amplitude des oscillations journalières de température est de 4° ce qui, compte tenu du gradient thermique, correspond à une amplitude des mouvements verticaux de 80 m (± 40) environ.

A 600 m (courantomètre 162), à la même date, l'amplitude des oscillations journalières n'est que de $1,2^\circ\text{C}$, ce qui correspond néanmoins, compte tenu d'un gradient thermique plus faible à 80 m également. A 900 m (courantomètre 133) on obtient environ $0,5^\circ\text{C}$ et 60 m. Pour mémoire : à 400 m, le 4/02/1983, on enregistrait $4,8^\circ\text{C}$, soit 100 m d'amplitude.

ETM 84 - 5eme CAMPAGNE - POINT B5 - LIGNE 3 - T 238

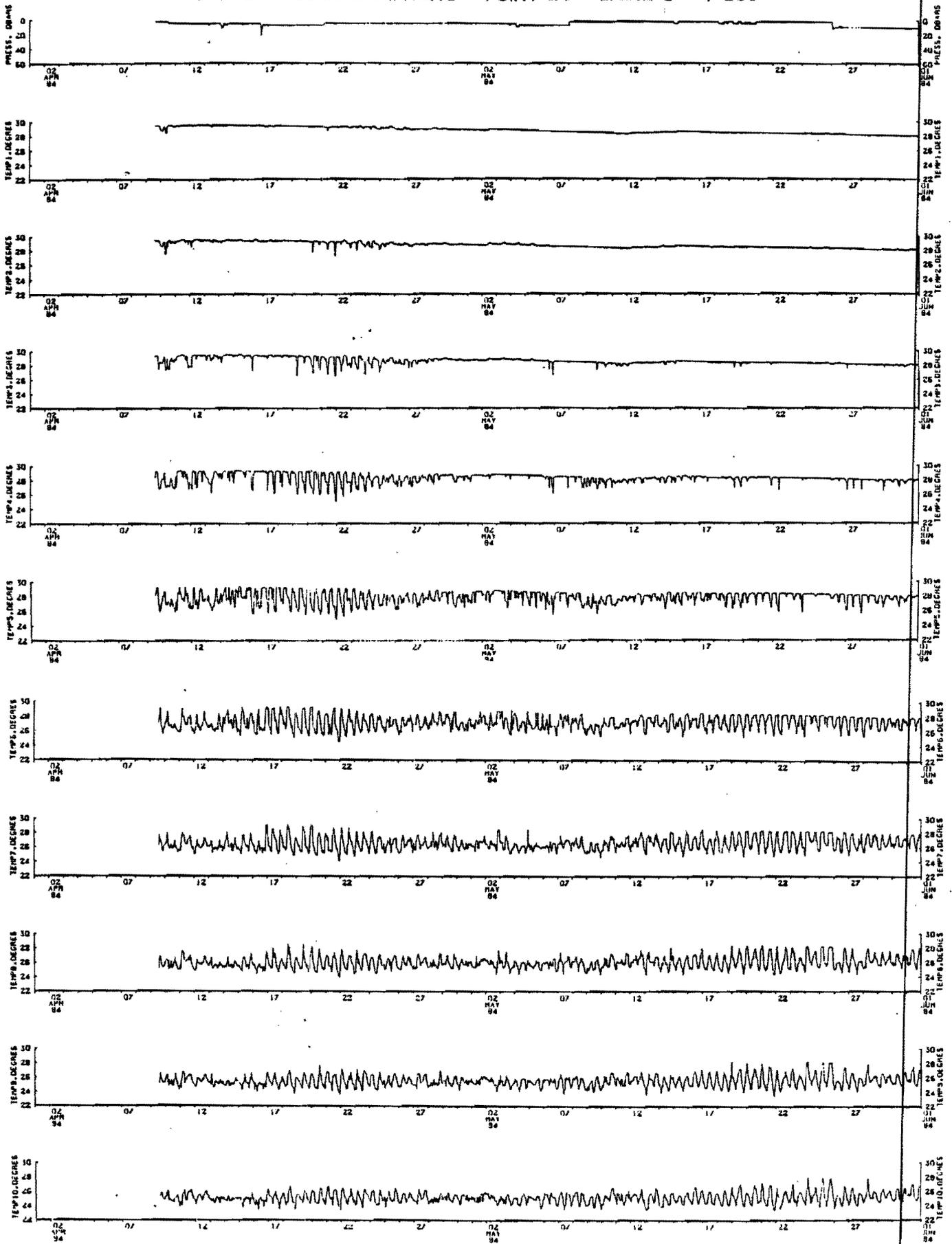


Fig.23 VARIATIONS DES TEMPERATURES ENTRE 20 ET 110 METRES

Immersion : 20 à 120 m - Fond : 245 m - Cadence 60 minutes

MOYENNES ET EXTRÊMAS

PÉRIODE	1984							MOYENNE
	AVRIL	MAI	JUIN	JUILLET	AOÛT	SEPT.	OCT.	
IMMERSION 0 dbars	23	23	22	22	23	22	22	23
— 10 m T1	Min 28,44 Moy 29,25 Max 29,59	Min 28,01 Moy 28,46 Max 28,92	Min 27,31 Moy 27,87 Max 28,32	Min 26,03 Moy 26,57 Max 27,31	Min 25,44 Moy 25,82 Max 26,27	Min 25,72 Moy 26,61 Max 27,22	Min 26,24 Moy 27,05 Max 27,71	27,30
— 20 m T2	Min 27,13 Moy 29,17 Max 29,68	Min 27,92 Moy 28,47 Max 29,16	Min 27,28 Moy 27,88 Max 28,35	Min 26,03 Moy 26,58 Max 27,34	Min 25,44 Moy 25,82 Max 26,36	Min 25,51 Moy 26,54 Max 27,22	Min 25,81 Moy 26,84 Max 27,65	27,26
— 30 m T3	Min 26,45 Moy 28,90 Max 29,65	Min 26,63 Moy 28,42 Max 29,05	Min 27,15 Moy 27,87 Max 28,38	Min 25,86 Moy 26,56 Max 27,31	Min 25,31 Moy 25,79 Max 26,36	Min 25,22 Moy 26,37 Max 27,09	Min 25,31 Moy 26,51 Max 27,46	27,15
— 40 m T4	Min 25,04 Moy 28,38 Max 29,46	Min 26,09 Moy 28,25 Max 28,91	Min 26,77 Moy 27,80 Max 28,30	Min 25,78 Moy 26,51 Max 27,26	Min 24,70 Moy 25,73 Max 26,31	Min 24,86 Moy 26,08 Max 26,95	Min 24,86 Moy 26,13 Max 27,32	26,96
— 50 m T5	Min 24,82 Moy 27,75 Max 29,43	Min 25,44 Moy 27,89 Max 28,86	Min 25,56 Moy 27,70 Max 28,34	Min 25,53 Moy 26,49 Max 27,27	Min 24,45 Moy 25,69 Max 26,30	Min 24,33 Moy 25,80 Max 26,91	Min 24,55 Moy 25,85 Max 27,12	26,73
— 60 m T6	Min 24,48 Moy 27,10 Max 29,32	Min 25,22 Moy 27,31 Max 28,86	Min 25,00 Moy 27,41 Max 28,31	Min 25,07 Moy 26,41 Max 27,28	Min 24,08 Moy 25,60 Max 26,33	Min 23,89 Moy 25,52 Max 26,88	Min 24,17 Moy 25,59 Max 27,00	26,43
— 70 m T7	Min 24,11 Moy 26,48 Max 29,26	Min 24,63 Moy 26,69 Max 28,56	Min 24,51 Moy 27,03 Max 28,28	Min 24,73 Moy 26,28 Max 27,21	Min 24,02 Moy 25,47 Max 26,30	Min 23,52 Moy 25,27 Max 26,88	Min 23,89 Moy 25,34 Max 26,79	26,10
— 80 m T8	Min 23,90 Moy 25,93 Max 28,63	Min 24,21 Moy 26,41 Max 28,45	Min 24,18 Moy 26,58 Max 28,30	Min 24,40 Moy 26,07 Max 27,23	Min 23,90 Moy 25,31 Max 26,31	Min 23,28 Moy 25,02 Max 26,74	Min 23,25 Moy 25,07 Max 26,28	25,75
— 90 m T9	Min 23,62 Moy 25,52 Max 27,81	Min 23,50 Moy 25,68 Max 28,30	Min 23,71 Moy 26,10 Max 28,27	Min 24,02 Moy 25,79 Max 27,23	Min 23,71 Moy 25,13 Max 26,25	Min 22,97 Moy 24,79 Max 26,09	Min 22,53 Moy 24,81 Max 25,75	25,43
— 100 m T10	Min 23,43 Moy 25,13 Max 26,83	Min 23,36 Moy 25,24 Max 28,18	Min 23,36 Moy 25,60 Max 28,27	Min 23,61 Moy 25,45 Max 27,23	Min 23,24 Moy 24,95 Max 26,21	Min 22,80 Moy 24,57 Max 25,81	Min 22,03 Moy 24,55 Max 25,56	25,09
NOMBRE DE MESURES	515	745	721	745	745	721	514	4700

TABLEAU 10

Les ondes observées sont probablement dues à l'interaction de l'onde marée avec le relief que constitue l'ensemble Tahiti-Moorea. Leur période est, en effet, semi-diurne. On en déduit que les vitesses verticales maximales pour une amplitude de environ ± 50 m atteindraient $V_{max.} = 50 \times 2 / T = 0,7$ cm/s.

En l'absence d'une description théorique de ces ondes, l'estimation des courants horizontaux associés nécessiterait l'élaboration d'un modèle numérique de la marée autour de Tahiti-Moorea.

Toutefois, étant donné la période de ces ondes, les valeurs extrêmes enregistrées par les courantomètres intègrent bien la contribution de ces ondes internes.

Aux niveaux 300 m, 600 m et 900 m, les oscillations à la période semi-diurne représentent l'essentiel du signal du courant et ne présentent pas d'inversion de phase. A la même date (23/03/1983), l'amplitude des oscillations est d'environ ± 25 cm/s à 300 m, ± 18 cm/s à 600 m, pour s'atténuer à ± 6 cm/s à 900 m.

Il ne semble donc pas y avoir à craindre d'effets désastreux sur les structures dues aux phénomènes d'ondes internes.

Cependant, l'étude de l'impact écologique des rejets d'une part et la préférence qui semble accordée à une solution flottante dans la zone difficile (tombant et piémont) peut rendre nécessaire une connaissance plus détaillée des courants et des oscillations de température entre 100 et 200 m sous la couche homogène.

En effet, ces marées internes peuvent être à l'origine d'erreurs dans l'interprétation des mesures hydrologiques (DEFANT, 1950). En outre, elles semblent être une source importante de l'agitation interne des océans et des mélanges. WUNSCH (1975) trouve qu'au moins 10 % de l'énergie des marées barotropes sont transférés dans les marées internes, ce qui par comparaison est similaire à l'apport d'énergie dans la circulation générale.

Ces oscillations internes sont aussi importantes au niveau de la chaîne alimentaire par les interactins qu'elles pourraient avoir sur le phytoplancton (KAMYKOWSKI, 1974). Elles semblent aussi avoir une influence directe sur la répartition des poissons. En effet, une expérience de 24 traits de chalut toutes les deux heures sur le plateau ivoirien, encadrée par quatre jours de mesures physiques en continu, semble montrer que des mouvements de certains poissons correspondent aux variations de températures dues aux marées internes.

4.2. Salinité

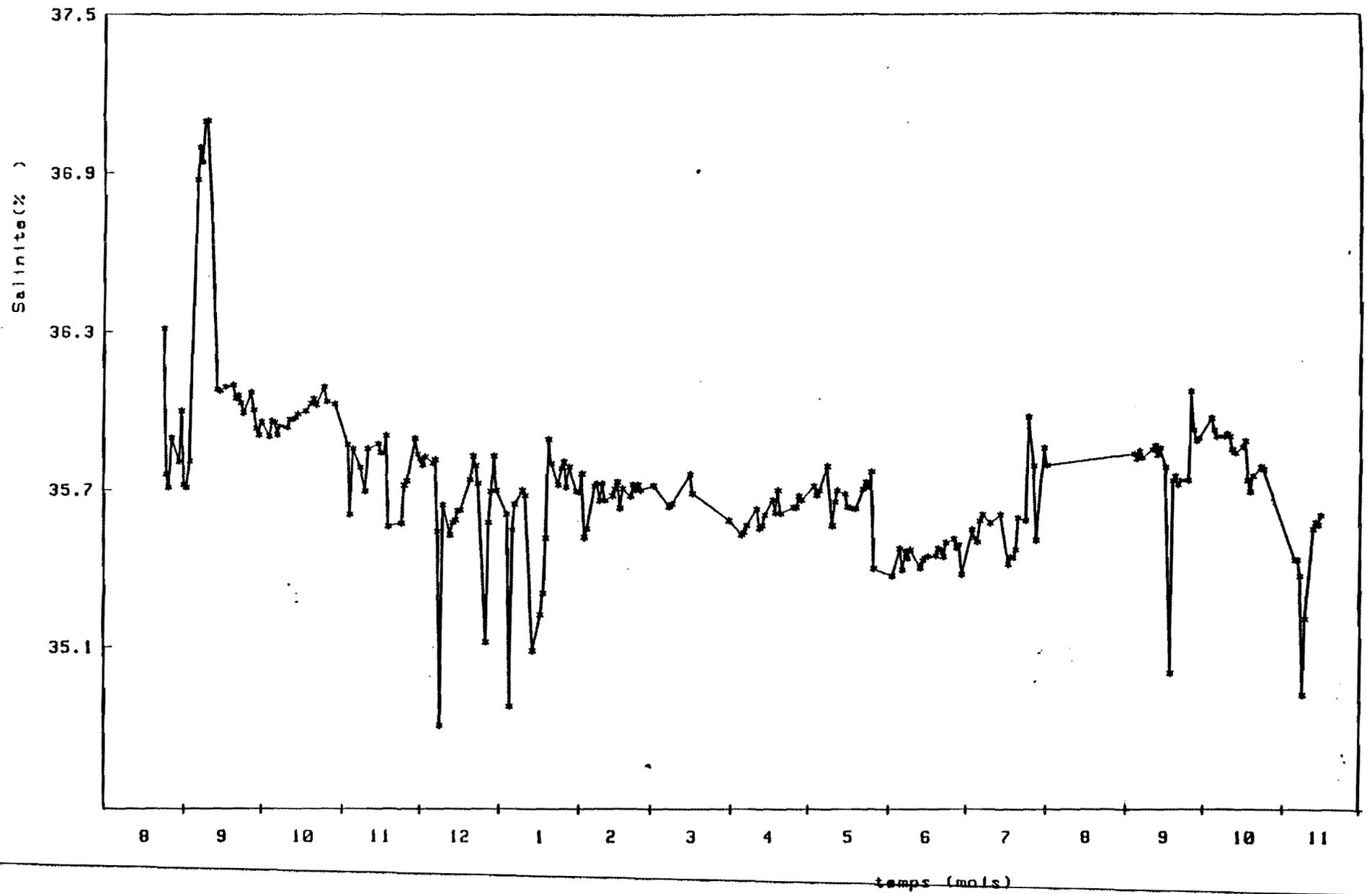
4.2.1. Salinité dans le lagon de Taunoa

Le lagon de Taunoa paraît subir l'influence des rivières qui s'y déversent, notamment à l'occasion de pluies abondantes (RICARD et al., 1981). Dans l'ensemble les eaux de surface ont une salinité légèrement plus faible que celles des eaux du fond. Des lentilles d'eau dessalée peuvent apparaître temporairement, ainsi que des salinités de 32,5°/ .. à 33°/ .. ont pu être enregistrées en face de la rivière Fautaua. Malgré ces exceptions, la salinité des eaux est d'une manière générale peu différente de celle des eaux océaniques superficielles (35,5 °/ .. à 36 °/ ..) et l'homogénéité des eaux dans le lagon confirme la faible importance des rejets d'eau douce d'origine continentale en dehors des périodes de pluie intense.

4.2.2. Salinité des eaux océaniques

Les données de salinité effectuées au cours de la mission E.T.M. sont peu nombreuses car les courantomètres SUBER ne sont pas équipés de capteurs de salinité. Toutefois, quelques profils de salinité entre la surface et - 1000 m ont été mesurés au cours des missions hydrologiques et notamment au cours du mois de mars 1984 durant lequel nous disposions de la sonde température, salinité profondeur de l'ORSTOM Nouméa. Par ailleurs, des mesures quotidiennes effectuées par l'ORSTOM Tahiti permettent de cerner avec précision les variations saisonnières de la salinité à la surface de l'eau (ROUGERIE et al., 1985) (figure 24) (CHARPY et TEURI, 1985).

Fig.24: Evolution de la Salinite (‰) a la digue nord est de Papeete en 1983 et 1984



Les variations temporelles de la salinité ($34,2^\circ/ \dots - 36,4^\circ/ \dots$) ne présentent pas de cycle saisonnier très marqué, et le calcul de la salinité moyenne des eaux superficielles année par année révèle les fluctuations assez importantes de ce paramètre. En 1983, la salinité de $36,09^\circ/ \dots$ s'écarte de façon significative de celle de l'année 1984 ($35,43^\circ/ \dots$). L'interprétation de ces fluctuations ne peut se faire que dans le cadre hydroclimatologique général de la zone polynésienne.

Ponctuellement, on peut observer des baisses de salinité de courte durée dues probablement à des apports d'eau douce d'origine terrestre.

En ce qui concerne les variations de salinité en fonction de la profondeur, on peut distinguer sur le profil quatre couches d'eaux différentes (mars 1984) :

- une couche superficielle de 0 m à - 50 m où la salinité varie peu ($35,56^\circ/ \dots - 35,76^\circ/ \dots$),

- une couche sous-jacente de - 50 m à - 150 m où l'on observe un maximum de salinité atteignant $36,16^\circ/ \dots$,

- en dessous de - 150 m et jusqu'à - 500 m, la salinité diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur de $34,53^\circ/ \dots$ ($S^\circ/ \dots = 0,0036^\circ/ \dots \cdot m^{-1}$),

- de 500 m à 1000 m la salinité se maintient à une valeur sensiblement constante et proche de $34,5^\circ/ \dots$.

4.3. Densité de l'eau de mer

La densité de l'eau de mer dépend à la fois de sa température, de sa salinité et de la pression à laquelle elle est soumise (c'est à dire la profondeur à laquelle elle se trouve).

La densité ρ des eaux marines étant toujours voisine de 1, on utilise en océanographie la quantité

$$\sigma_m = \sigma_{s,t,p} = (\rho_{s,t,p} - 1) 1000$$

DENSITE DE L'EAU

σ_t - Fluctuations normales saisonnières moyennes

	0 à 25	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200
mini	22,73	23,03	23,77	24,94	25,76	26,41	26,84	27,03	27,14	27,23	27,29	27,36	27,42	27,48
maxi	23,89	23,94	24,26	25,18	26,05	26,72	27,01	27,15	27,24	27,32	27,40	27,45	27,50	27,56
Variation	1,16	0,91	0,49	0,24	0,29	0,31	0,17	0,12	0,1	0,09	0,11	0,09	0,08	0,08

σ_t - Fluctuations normales saisonnières min. et max.

	0 à 25	50	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1.000	1.100	1.200
mini	21,98	22,29	23,23	24,5	25,51	26,15	26,58	26,82	27,01	27,06	27,22	27,24	27,40	27,44
maxi	24,46	24,41	24,76	25,82	26,44	27,16	27,58	27,69	27,76	27,98	27,77	27,75	27,72	27,68
Variation	2,48	2,12	1,53	1,32	0,63	1,01	1,00	0,87	0,75	0,92	0,55	0,51	0,32	0,24

Données extrêmes de sauvegarde : sans objet

TABLEAU 11

73
DENSITE DE L'EAU

VALEURS MOYENNES

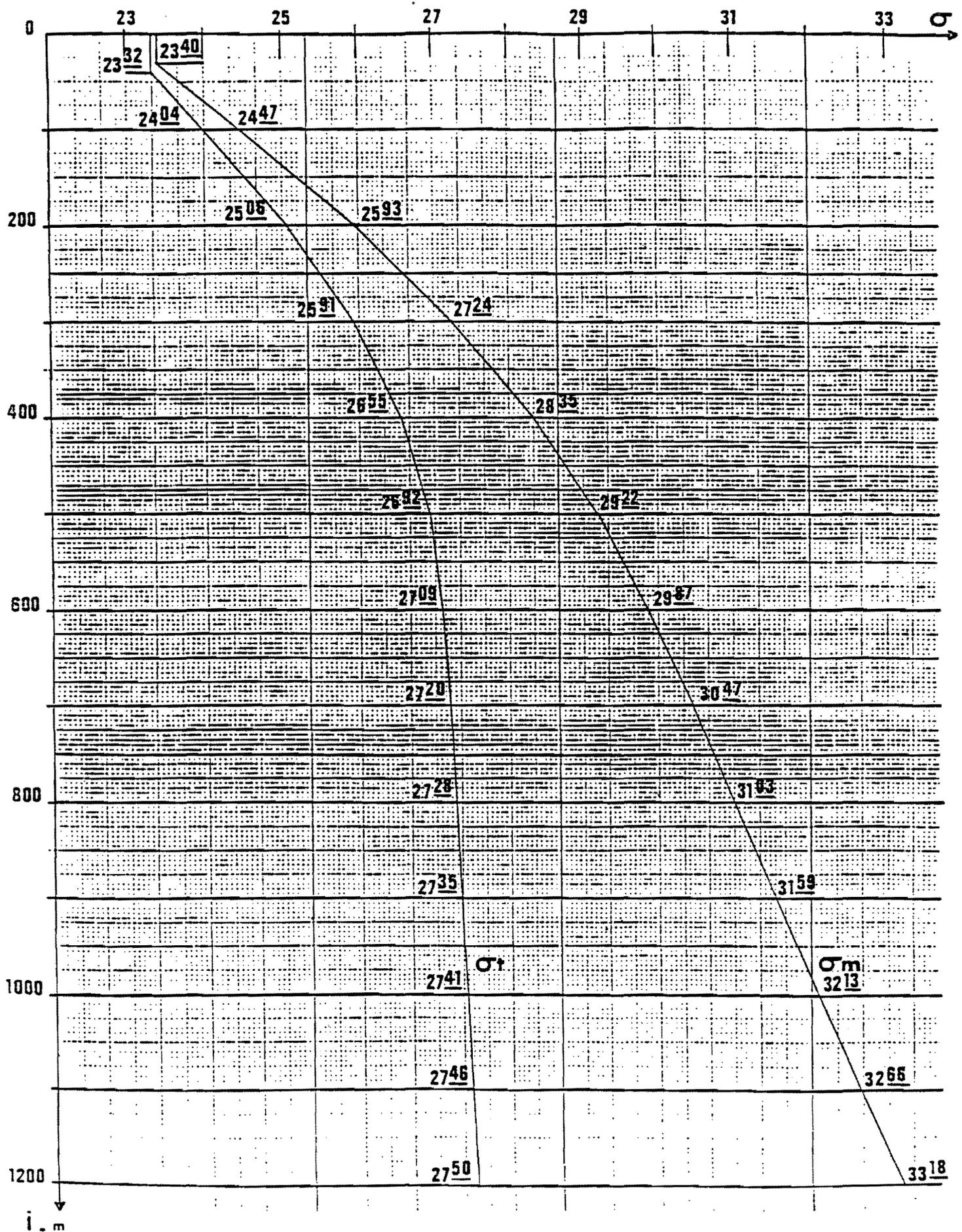


Fig.25

Plus couramment on utilise le paramètre $\sigma_{s,t,p}$ correspondant à la pression atmosphérique, c'est à dire à une pression hydrostatique nulle. On le désigne pour simplifier par σ_t .

Les variations de la densité des eaux côtières de Tahiti, paramètre important pour déterminer le comportement du panache des eaux de rejet, sont décrites sur la figure 25 et le tableau 11.

5. CARACTERISTIQUES HYDROBIOLOGIQUES

5.1. Le lagon (DE NARDI et al, 1983)

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.

La température et la salinité sont relativement stables ($t^{\circ}=28^{\circ}\text{C}$, $S=35,6 - 36 \%$.) et un léger gradient existe entre la baie du Taaone et le fond du lagon vers le port.

Pauvres en sels nutritifs, les eaux lagunaires présentent des fluctuations dues aux apports telluriques des rivières du fond de la baie. Au moment des fortes pluies, la charge en seston est particulièrement élevée (10-11 mg/l) par rapport à celle mesurée dans les lagons des îles voisines (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 $\mu\text{g/L}$), 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 les dinoflagellés prédominent. Certaines espèces d'eau douce et benthiques confirment l'influence continentale (RICARD, 1986).

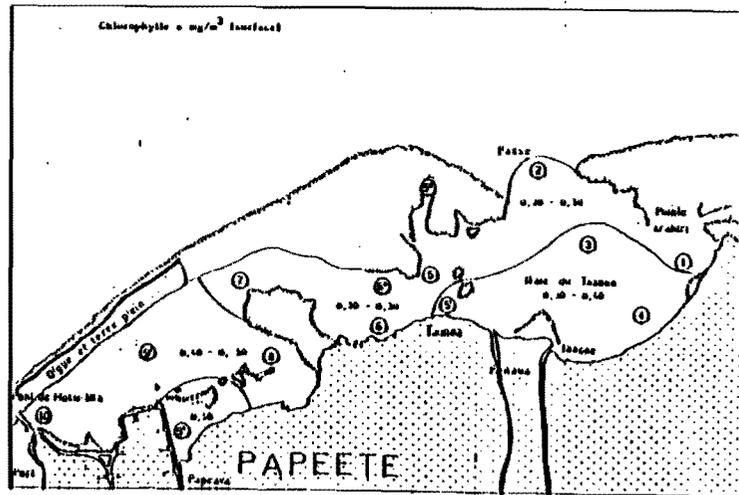
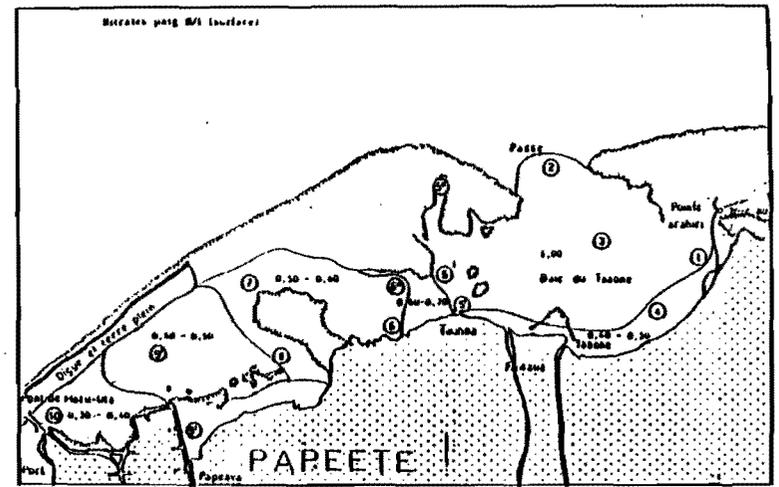
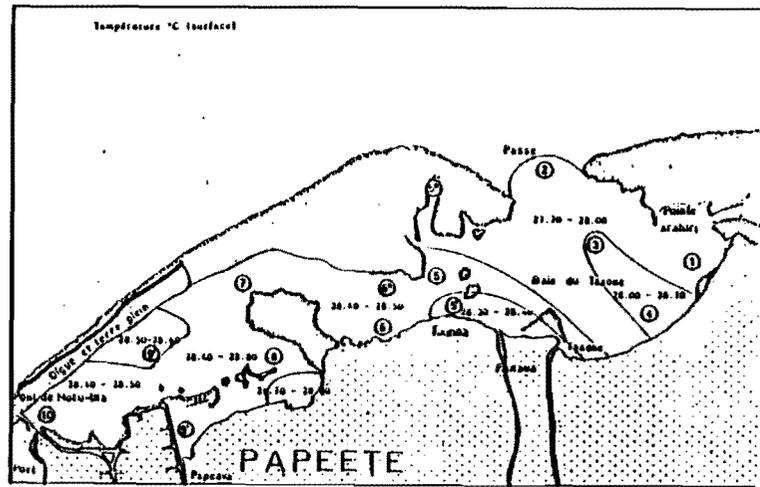


Fig.26a

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 lagunaire et océanique.

La figure 26 résume les mesures des principaux paramètres hydrobiologiques du lagon.

5.2. Les abords extérieurs du site

5.2.1. Les sels nutritifs inorganiques dissous

Les sels nutritifs (azote, phosphore, silice) sont des éléments essentiels de la production biologique, mais un apport trop important pour la capacité d'utilisation du milieu peut conduire à un développement végétal excessif entraînant de profondes altérations du milieu. L'examen de leur distribution dans le milieu est fondamental dans le cadre de l'étude ETM, car les eaux profondes riches en éléments favorables à la croissance du phytoplancton seront rejetées dans des eaux superficielles presque dépourvues de ces composées chimiques.

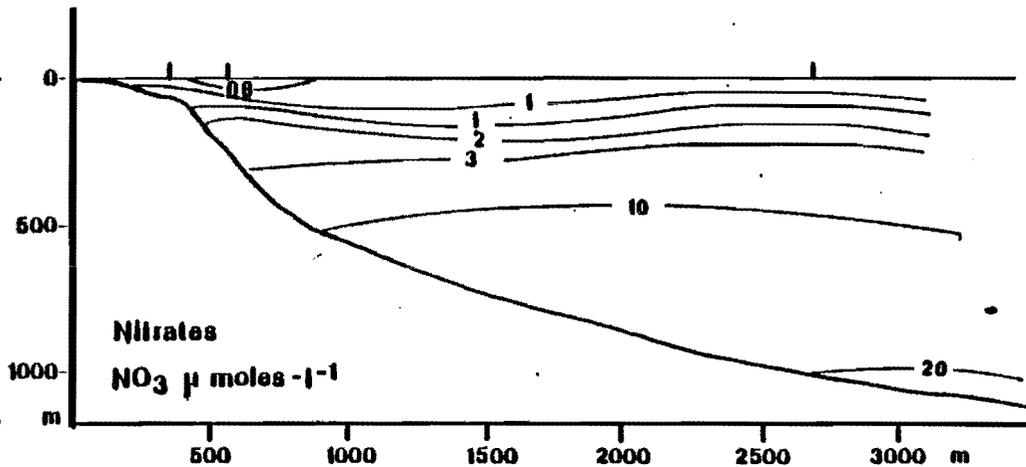
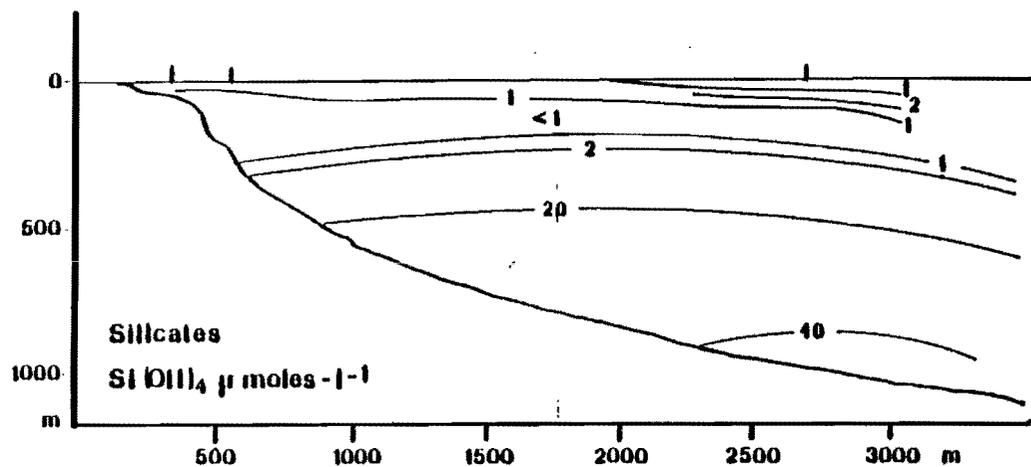
5.2.1.1. Azote minéral (N-NO₃)

L'azote minéral dissous peut apparaître, sous trois formes dans les eaux marines, qui vont de la plus oxydée à la plus réduite : les nitrates, les nitrites et l'ammonium. Seuls les nitrates seront considérés ici, compte tenu que les nitrites sont un stade extrêmement labile et que les teneurs en ammonium sont très faibles dans les eaux subtropicales.

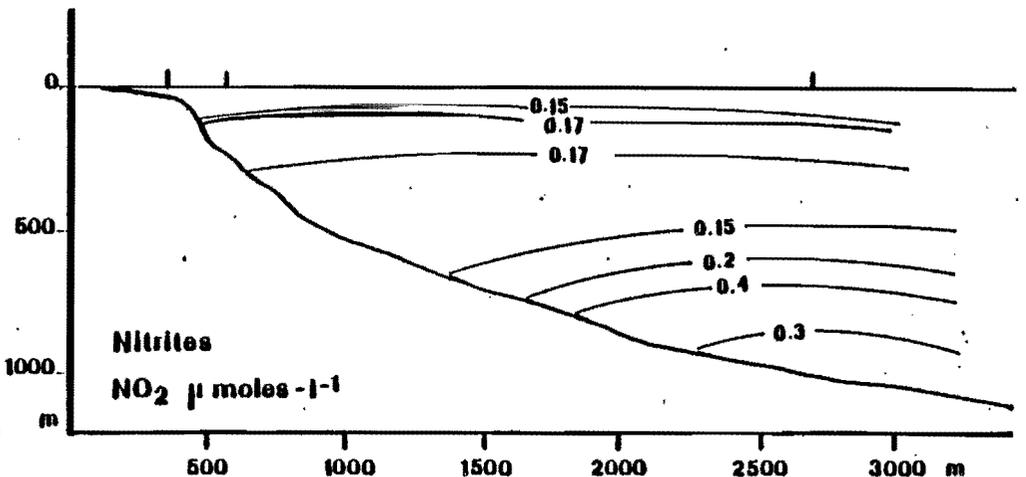
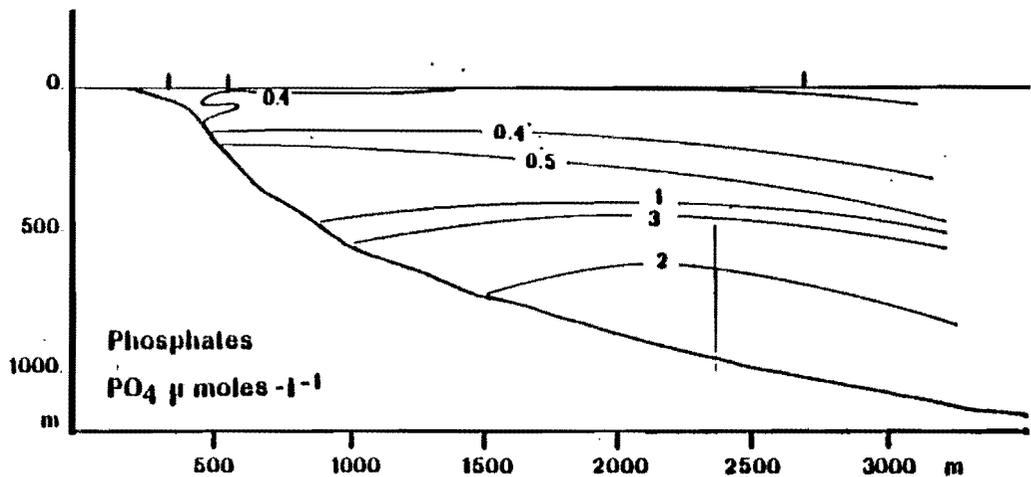
Variations des teneurs en nitrate avec la profondeur

Dans les eaux superficielles, ainsi que dans les eaux du lagon (hormis dans le cas où il existe des apports d'eau douce importants), les teneurs en nitrates dans l'eau sont extrêmement faibles ($< 0,5 \mu\text{mole.l}^{-1}$) du fait de la consommation par le phytoplancton et des faibles apports. Quelques valeurs plus élevées ont pu être enregistrées, mais il s'agit là de valeurs ponctuelles, pouvant résulter de la présence d'eaux dessalées provenant du lagon ou de problèmes analytiques rencontrés lors des analyses.

Fig.27 REPARTITION SPATIALE DES SELS NUTRITIFS

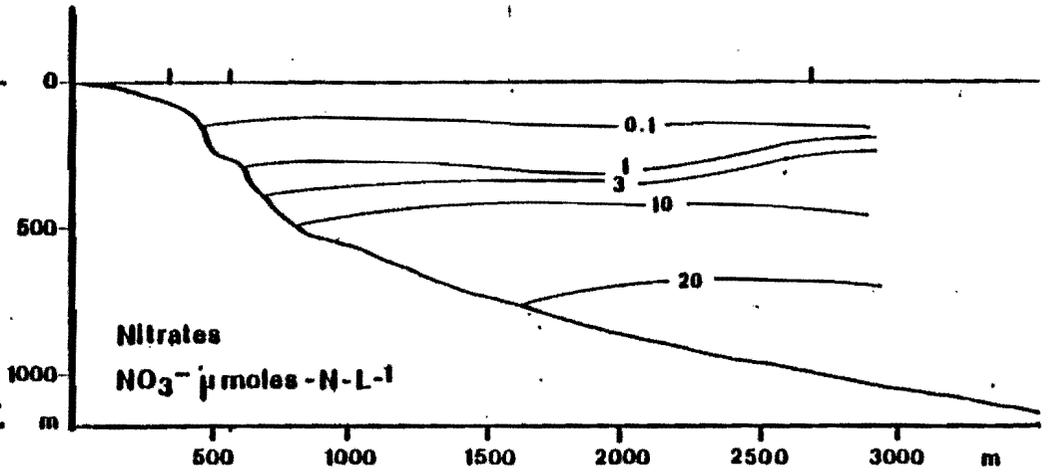
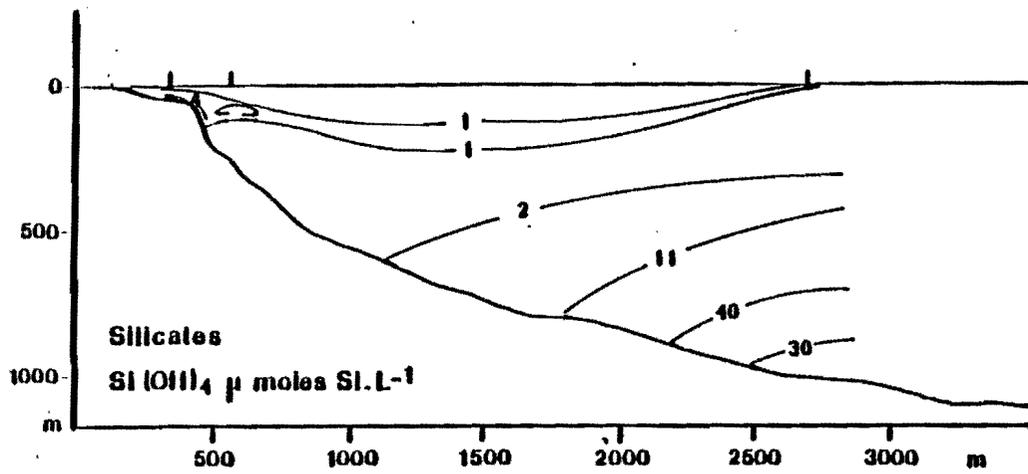


Mars 1983

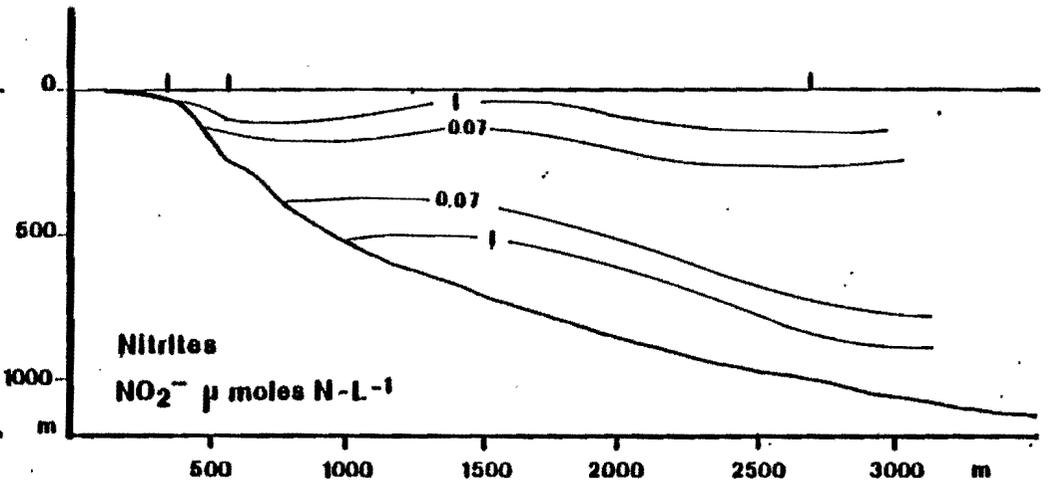
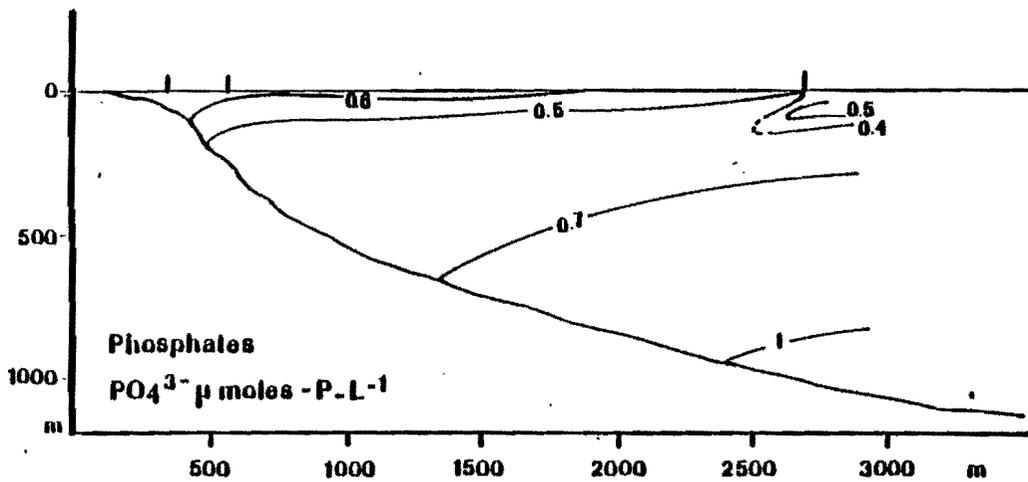


Mars 1983

Fig.28 REPARTITION SPATIALE DES SELS NUTRITIFS



Novembre 1982



Novembre 1982

La teneur des eaux en nitrates augmente avec la profondeur. A partir de 150 à 200 m, les valeurs observées atteignent 2 à 3 $\mu\text{moles.l}^{-1}$, puis il existe un maximum de concentration vers 800-1000 m avec des teneurs pouvant varier de 20 à 30 $\mu\text{moles.l}^{-1}$.

Vers 700 m de profondeur, là où sera pompée l'eau froide, on peut s'attendre à trouver des teneurs en nitrate voisines de 20 $\mu\text{moles.l}^{-1}$.

Variations spatiales des nitrates

La figure 28 illustre les variations spatiales des nitrates au droit du site. Cet exemple montre qu'il n'existe pas de gradient côte-large très marqué dans une zone comprise entre la côte et 3,5 km au large, bien qu'à certaines périodes on puisse observer des valeurs en NO_3 plus élevées aux stations les plus côtières. Ces valeurs élevées, probablement d'origine terrigène, pourraient expliquer la plus grande abondance de phytoplancton à proximité du platier récifal (cf. page).

Variations des teneurs en nitrates avec la température

Il a été possible d'établir une relation entre la teneur en nitrate de l'eau de mer et la température, du moins pour ce qui concerne les températures inférieures à 24°C (profondeur < 100 m). Cette relation est présentée sur la figure 29 et elle obéit à l'équation suivante :

$$\text{NO}_3 \mu\text{moles.l}^{-1} = 38,9e^{-0,156t^\circ\text{C}}$$

$$n = 51$$

$$r^2 = 0,837 \quad *** \quad p = 0,01$$

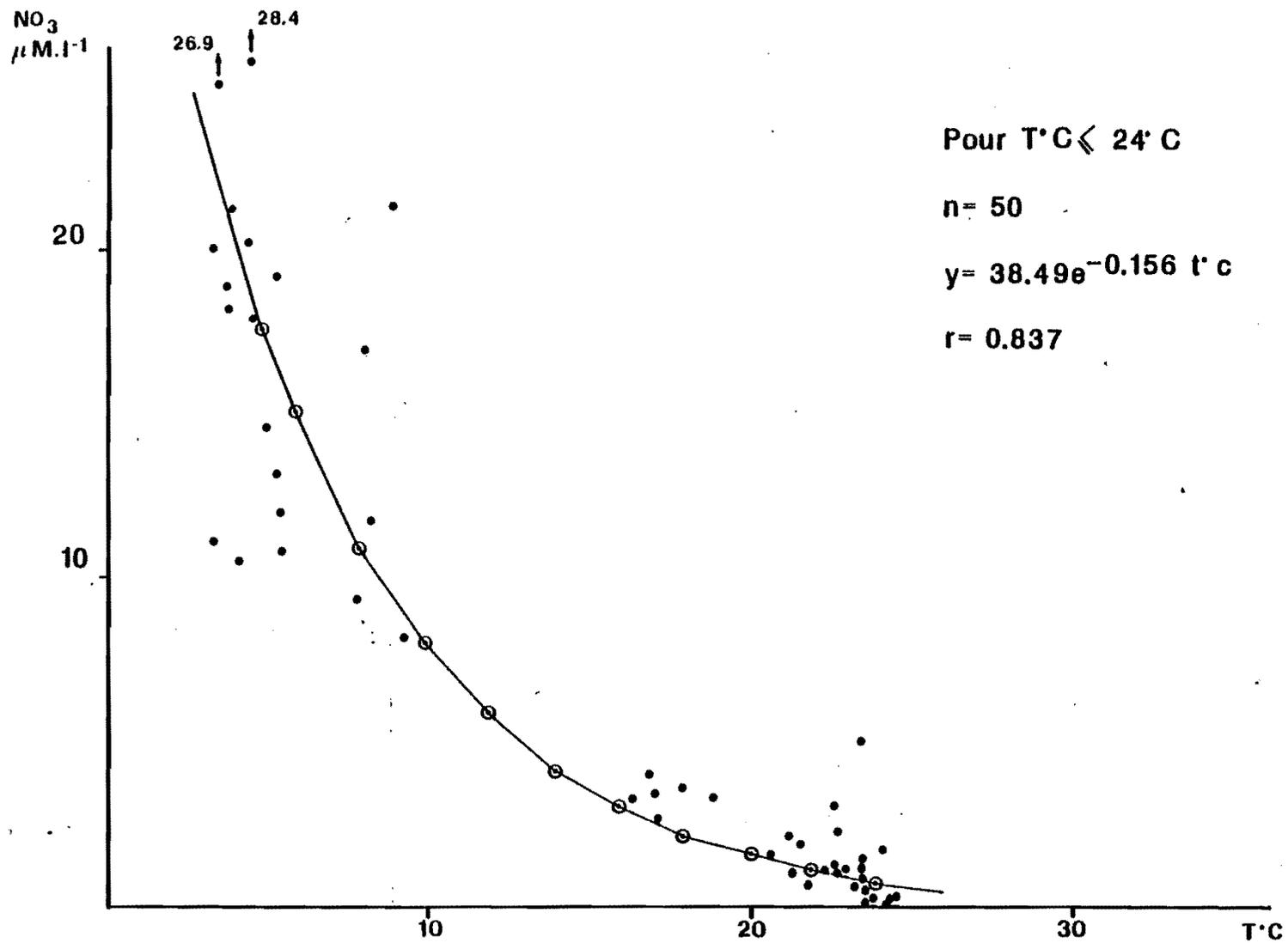
Cette relation permet d'établir une valeur calculée de la teneur en NO_3 pour une valeur donnée de température.

5.2.1.2. Le phosphate minéral (P.PO_4)

Variations des teneurs en phosphate

Les teneurs en phosphate des eaux superficielles sont également faibles au voisinage du site (généralement < 0,5 $\mu\text{moles.l}^{-1}$). Ces teneurs ne présentent pas de variations saisonnières décelables.

Fig.29 VARIATION DES TENEURS EN NITRATES EN FONCTION DE LA TEMPERATURE



Progressivement, en fonction de la profondeur, on observe une augmentation de la valeur des phosphates qui atteint $1 \mu\text{moles.l}^{-1}$ à 200 m et qui culmine à environ $3 \mu\text{moles.l}^{-2}$ vers 800-900 m.

De même que pour les nitrates, il n'existe pas de gradient côte-large très évident. Certaines valeurs plus élevées peuvent néanmoins être enregistrées près de la côte.

5.2.1.3. Les silicates (SiO_3)

Les concentrations de silice dissoute dans l'eau de mer sont plus variables que celles observées pour les nitrates et les phosphates. Les teneurs sont également généralement plus fortes que celles des sels minéraux précités, ce qui laisserait penser que la silice n'est pas un facteur limitant la croissance du phytoplancton. Selon les points de prélèvement, les teneurs des eaux superficielles en silice dissoute varient de 1 à $3 \mu\text{moles.l}^{-1}$ de SiO_2 .

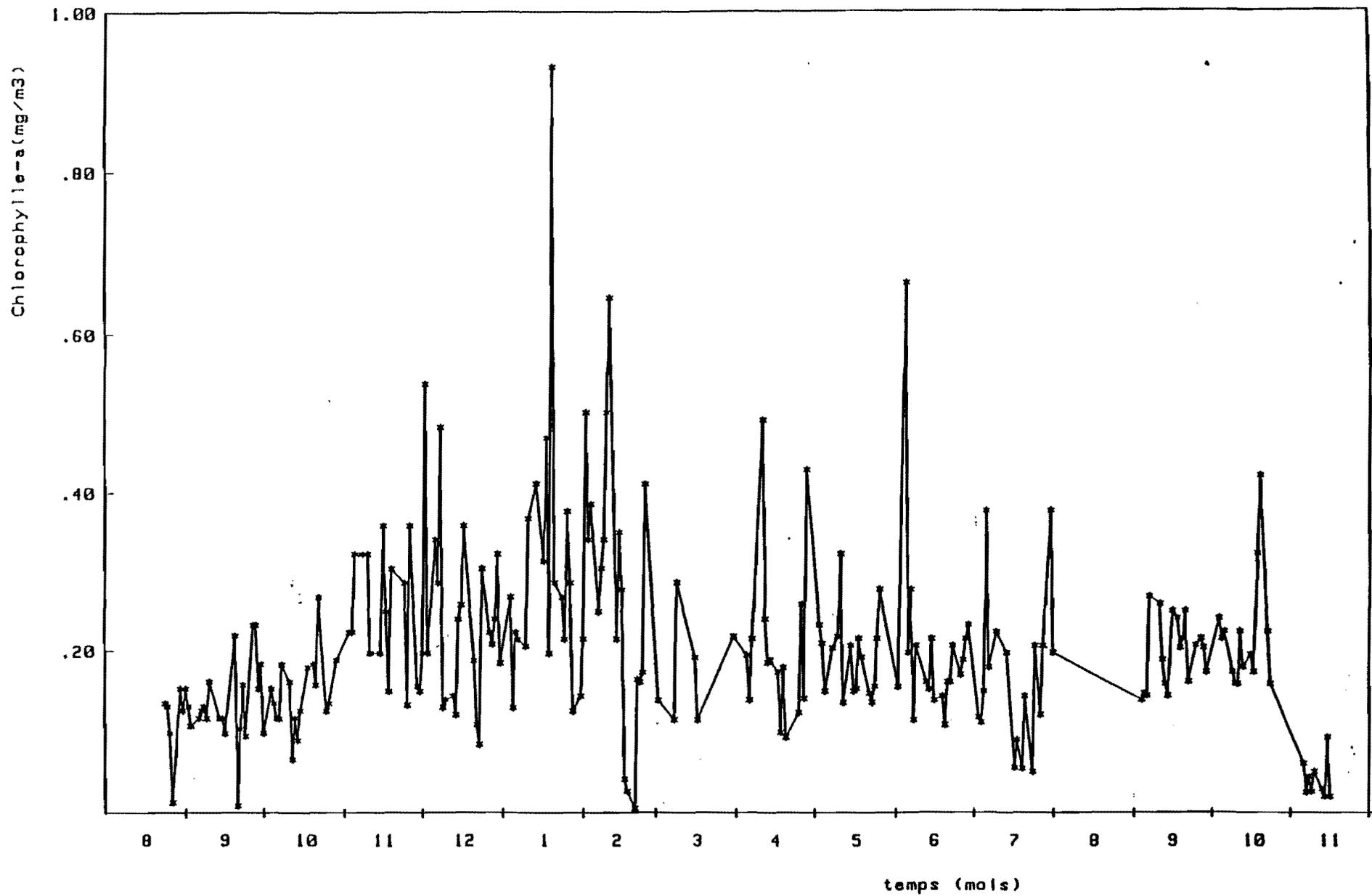
Au fur et à mesure que la profondeur augmente, les teneurs s'accroissent pour atteindre à 1000 m des valeurs de 30 à $40 \mu\text{moles.l}^{-1}$.

En résumé, les concentrations des sels nutritifs en fonction de la profondeur montrent une zone homogène de surface où les teneurs sont faibles. L'épaisseur de cette couche est de l'ordre de 200 m. En dessous de cette profondeur, on observe une augmentation progressive de la quantité de sels nutritifs qui peut atteindre à 1000 m 50 à 100 fois les valeurs de surface. C'est donc une eau riche en sels nutritifs qui sera rejetée dans les couches superficielles. Cet apport d'éléments nutritifs devrait stimuler la production primaire au voisinage de la centrale, si le temps de résidence des rejets dans les couches de surface est suffisamment long. Ce phénomène sera examiné dans le paragraphe où sont traités les effets de la centrale.

5.2.2. La chlorophylle a (figures 30 et 31)

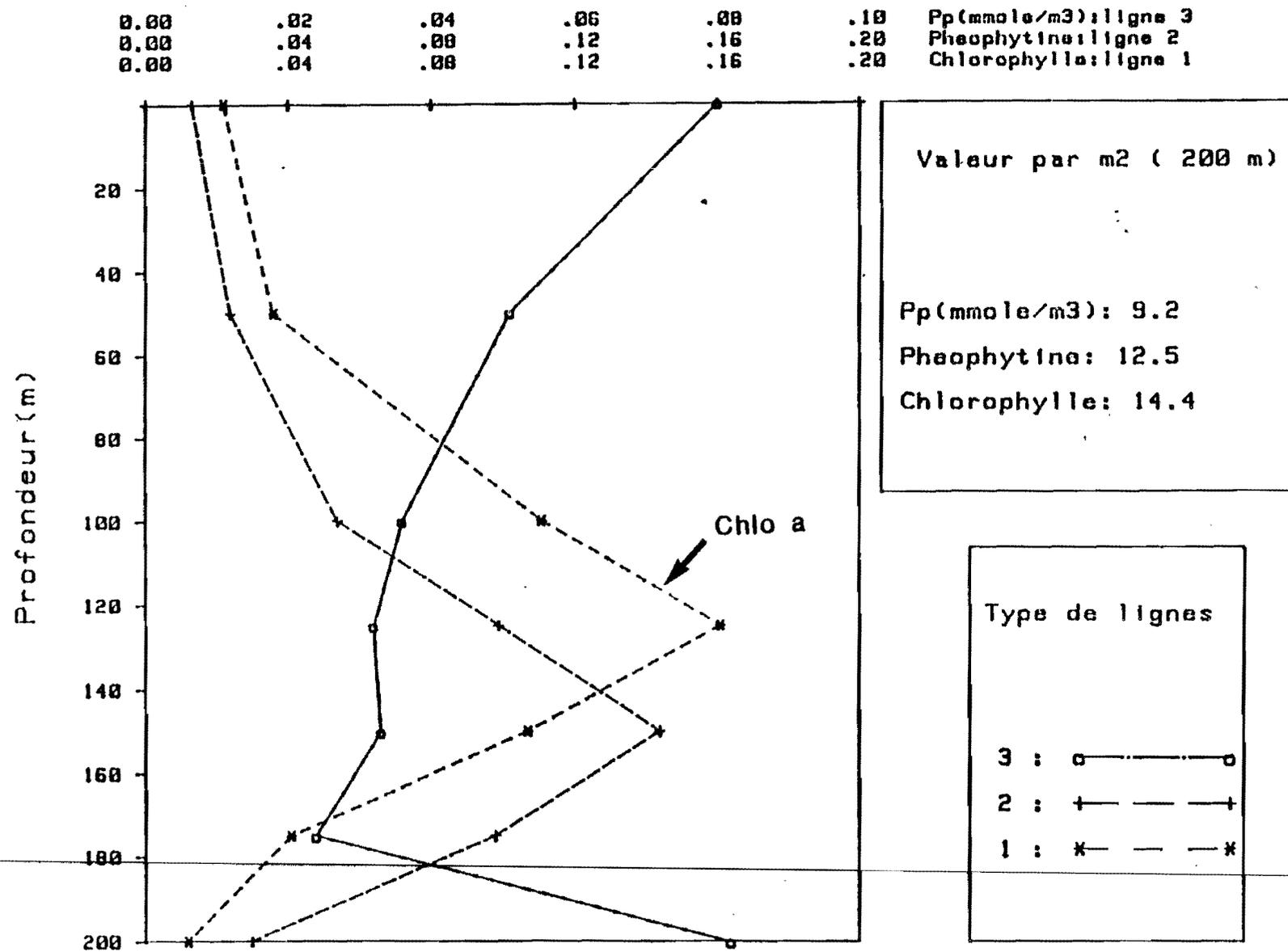
Les courbes de chlorophylle laissent apparaître un maximum subsuperficiel qui peut varier de 80 à 120 m, situé au niveau 6-7 % de la lumière incidente. Cette importante variation verticale pourrait être en relation avec un phénomène d'ondes internes particulièrement intense dans cette zone. De par leurs 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 lar-

Fig.30: Evolution de la Chlorophylle-a(mg/m³) a la digue nord est de PAPEETE en 1983 et 1984



In CHARPY et TEURI 1985

Fig.31 Evolution en fonction de la profondeur des parametres etudies a la station L-19/3/84



Valeur par m2 (200 m)

Pp (mmole/m3): 9.2
 Pheophytina: 12.5
 Chlorophylla: 14.4

Type de lignes

3 : ○ — — — ○
 2 : + — — — +
 1 : * — — — *

ORSTOM-TAHITI

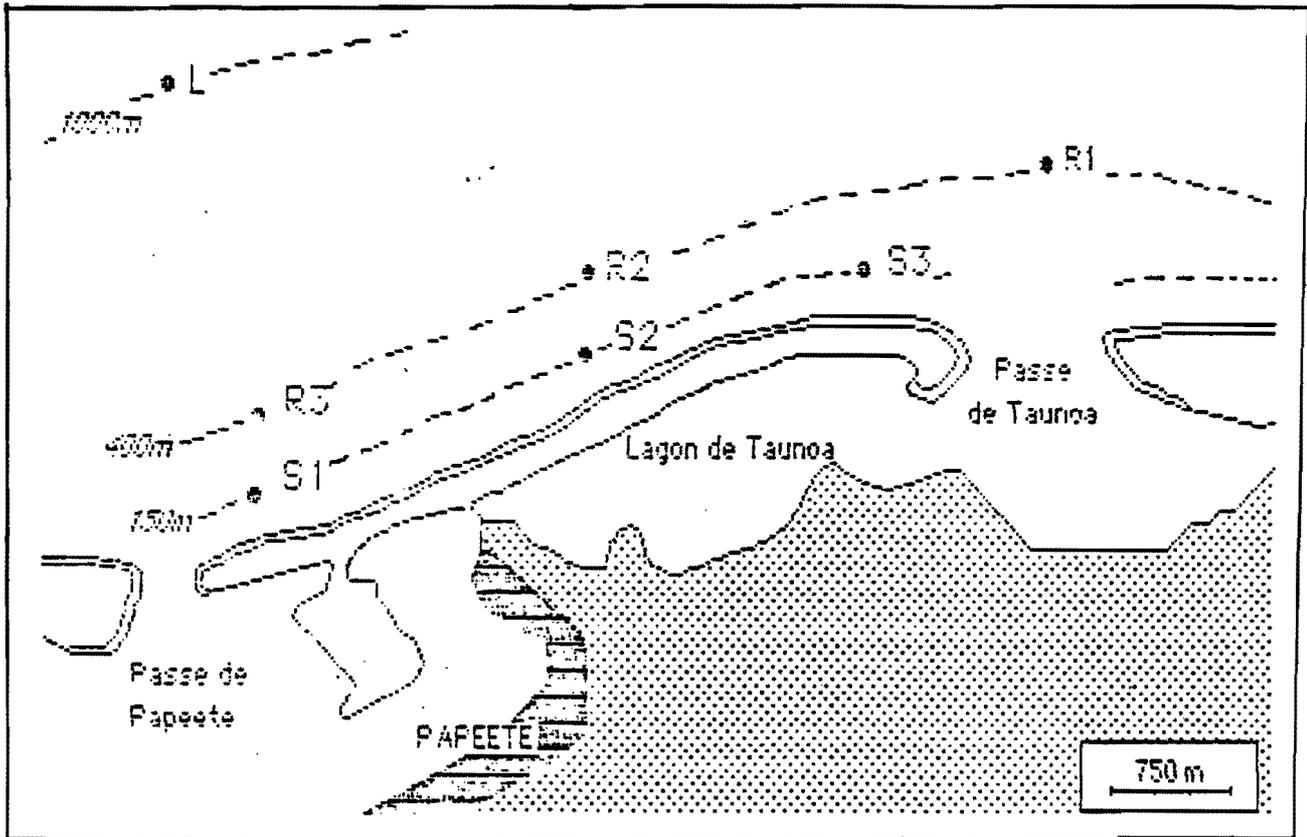


Fig.32 : Localisation des stations prospectées au cours des six campagnes de prélèvement au large du lagon de Taunooa (stations S sur l'isobathe 150m, R sur l'isobathe 400m, L sur l'isobathe 1000m).

in RICARD 1986

ge (0,04-0,23 mg/m³ ans le gyre central pacifique - EPPLEY et al, 1973). Les profils observés varient sensiblement au cours du temps. 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 (cf. page) peut être à l'origine d'un effet de masse insulaire qui pourrait contribuer à l'enrichissement en chlorophylle des eaux côtières (RICARD et DELASALLE, 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 chlorophylle 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 ETM en témoignent. 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), ou bien par d'autres phénomènes (SARABUN et al., 1985).

5.2.3. Le phytoplancton (RICARD, 1986)

Les études concernant le phytoplancton ont été réalisées par l'antenne du Museum d'Histoire Naturelle. Les campagnes de prélèvements aux stations mentionnées sur la figure 32 ont été réalisées de mars 1983 à novembre 1984. Les résultats sont analysés dans un rapport intitulé "PROJET ETM - Résultat des études de site - Biologie - Phytoplancton - Zooplancton - Salissures" (1986).

5.2.3.1. Analyse des diverses récoltes

5.2.3.1.1. Récoltes de mars 1983

Dans les eaux de surface, l'influence enrichissante des apports lagunaires se traduit par des concentrations cellulaires élevées au niveau des stations proches de la passe, et notamment aux stations S3, S2 et R2 et, à un degré moindre, aux stations S1, R1 et R3. Les stations L et R3 se comportent de la même façon, comme des stations océaniques peu ou pas influencées par les rejets continentaux transitant par la passe de PAPEETE. Les teneurs en chlorophylle sont également élevées aux stations placées sous l'influence directe de la passe de Taunoa, notamment S3, R1 et R2 ; ces teneurs en chlorophylle sont assez bien corrélées avec les densités cellulaires, particulièrement aux stations S2, S3 et R1. Les teneurs en phéopigments présentent pratiquement les mêmes pourcentages à toutes les stations.

Récoltes mars 1983 (0m)

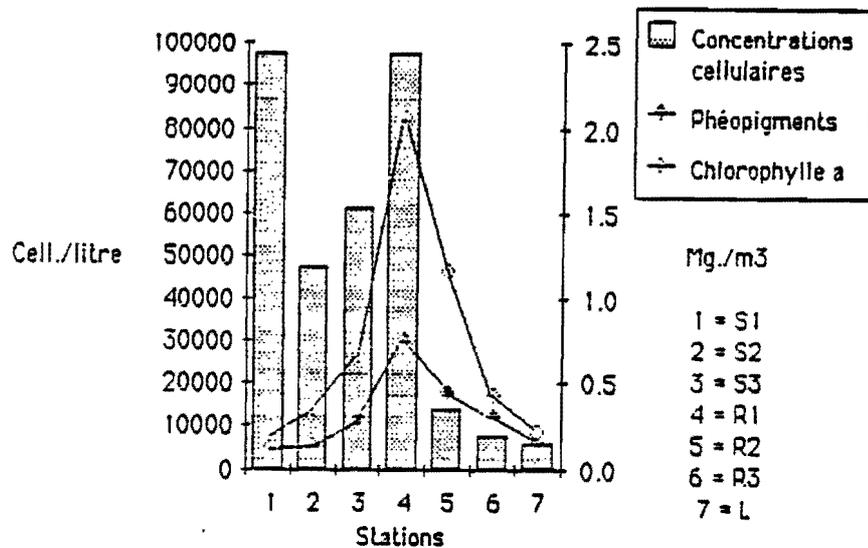


Figure 33 : Concentrations cellulaire et pigmentaire à 0 m (mars 1983)

Aux stations profondes (80 m), situées à la limite de la couche de compensation (à l'exception des stations S1, S2 et S3 atteignant 25 m de profondeur maximum en raison de leur proximité de la barrière récifale), les concentrations cellulaires sont également élevées. Aux stations subissant l'influence directe des apports lagunaires et insulaires (stations S1, S2, S3, R1, R2) transportés par les courants longeant le récif barrière et se déplaçant vers l'Ouest, seule la station R3, située à l'Est de la passe, et la station L, située au large, ne subissent pas cette influence continentale et présentent de faibles concentrations cellulaires.

A la station R2, une concentration cellulaire élevée, 330.000 cell./l, traduit l'existence de populations de diatomées extrêmement développées, populations essentiellement composées de diatomées euryhalines comme Synedra ulna.

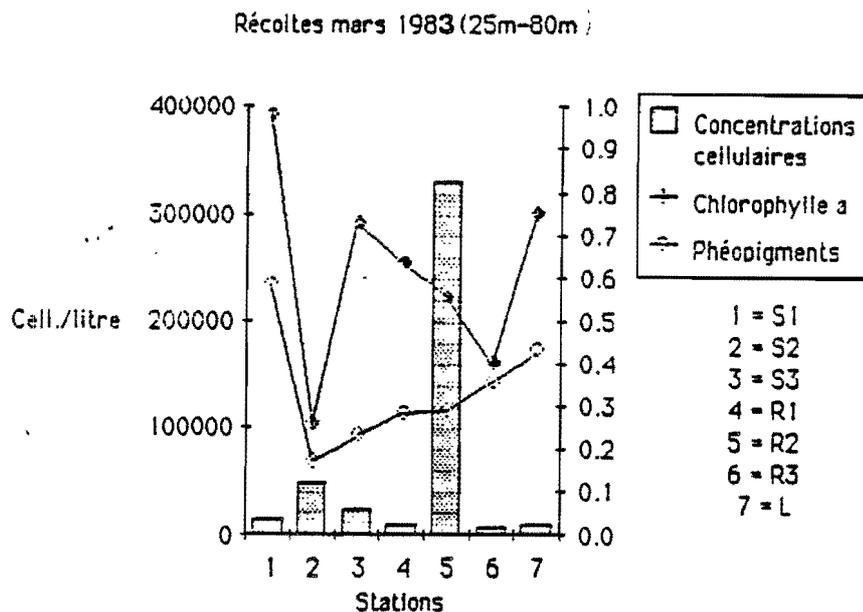


Figure 34 : Concentrations cellulaires et pigmentaires à 25 m (S1, S2, S3) et à 80 m (R1, R2, R3 L) en mars 1983.

Paradoxalement, les teneurs en chlorophylle a évoluent différemment, et ne reflètent pas les diverses concentrations cellulaires observées aux différentes stations ; seules les teneurs en phéopigments traduisent une augmentation, avec la profondeur, de pigments dégradés par rapport aux pigments actifs.

5.2.3.1.2. Récoltes d'octobre 1983

Les prélèvements réalisés en surface, au cours du mois de novembre, montrent que le phytoplancton de surface est relativement homogène et peu abondant, avec des concentrations cellulaires oscillant entre 38.000 et 18.000 cell./l, et des teneurs en chlorophylle relativement faibles : 0,10 à 0,05 mg/m³ ; les phéopigments sont également peu abondants et nettement inférieurs aux chlorophylles, sauf aux stations S2, R3 et L où ils atteignent les mêmes concentrations. Il n'y a pas de réelle corrélation entre les concentrations cellulaires et les concentrations pigmentaires. Les stations R3 et L, de caractère plus océanique, se distinguent des cinq autres stations.

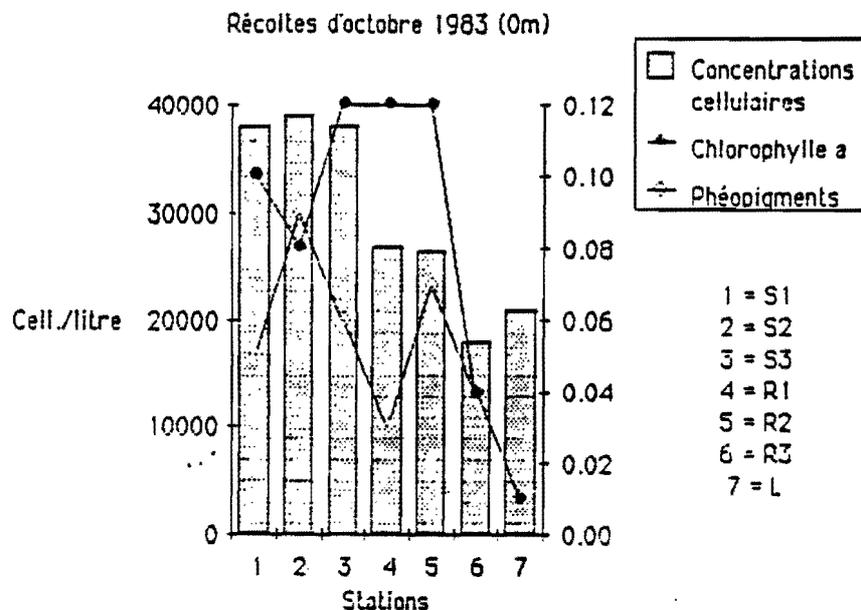


Figure 35 : Concentrations cellulaires et pigmentaires aux stations de surface en octobre 1983.

Aux stations profondes, les schémas évoluent sensiblement comme en mars, dans la mesure où les deux stations R1, et surtout R2 se distinguent des autres par de fortes concentrations cellulaires (R1 : 180.000 cell./l ; R2 : 725.000 cell./l). Il est intéressant de constater qu'à 6 mois d'écart la même situation s'observe en R2 : une forte concentration de formes euryhalines, dominée par *Synedra ulna*, témoignent de l'importance des rejets lagonaires et continentaux ; cette situation se retrouve, mais à un degré moindre, en S3 et S2 où *Synedra ulna* n'est plus dominante mais où les dinoflagellés néritiques, *Exuviella marina* notamment, sont abondants. Les pigments chlorophylliens sont toujours relativement peu abondants mais présentent une assez bonne corrélation avec les concentrations cellulaires ; les phéopigments suivent, en général, le même schéma distributif et, comme cela a été observé en surface, il apparaît une inversion de concentration aux stations S1 et L où les pigments dégradés dominent.

Les indices de diversité n'indiquent pas de phénomène particulier au sein des diverses populations. La plupart des populations présentent des indices relativement élevés en raison de l'absence de forte dominance d'un taxon ou d'un groupe de taxons.

Récoltes d'octobre 1983 (25m et 80m)

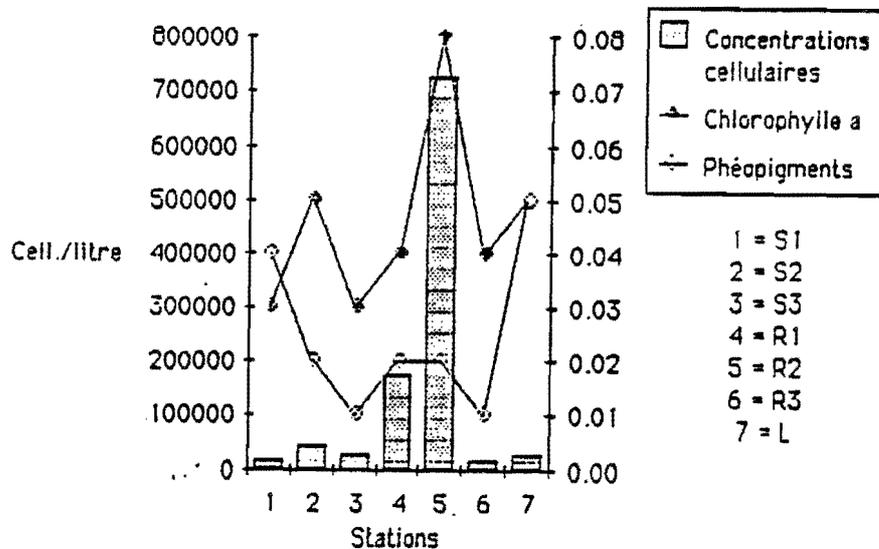


Figure 36 : Concentrations cellulaires et pigmentaires à 25 m (S1, S2, S3) et à 80 m (R1, R2, R3, L) en octobre 1983.

5.2.3.1.3. Récoltes de mars 1984

Les populations de surface et de profondeur sont relativement homogènes, tant qualitativement que quantitativement, reflétant ainsi des conditions environnementales relativement stables.

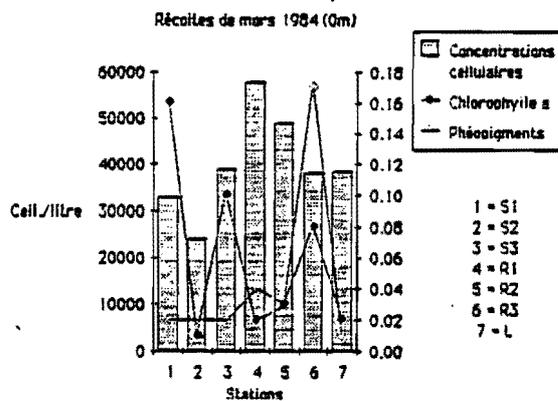


Figure 37 : Concentrations cellulaires et pigmentaires en surface, en mars 1984.

En surface, les stations R1 et R2 sont les plus riches en cellules planctoniques mais présentent les plus faibles concentrations en chlorophylle ; seule la station S1 se caractérise par une relative abondance en chlorophylle, en raison du nombre important de cellules tychoplanctoniques de grande taille, telle Grammatophora marina. Les indices de diversité sont relativement élevés et n'attirent pas de remarque particulière.

En profondeur, les concentrations cellulaires et pigmentaires sont bien corrélées. Les valeurs les plus élevées s'observent, comme à l'habitude, aux stations subissant le plus fortement l'influence de la passe, notamment aux stations R1 et R2. Comme dans les eaux de surface, les indices sont élevés en l'absence de dominance particulière ou de un ou plusieurs taxons ; seule la station R3 présente, à 200 m de profondeur, une dominance à 90 % de chlorophycées coloniales.

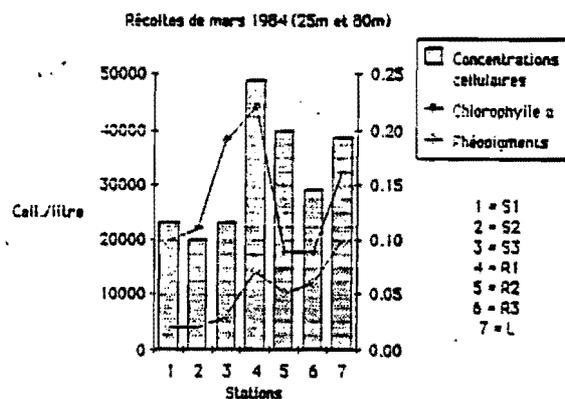


Figure 38 : Concentrations cellulaires et pigmentaires à 25 m (S1, S2, S3) et à 80 m (R1, R2, R3, L) en mars 1984.

5.2.3.1.4. Récoltes de juillet 1984

Les concentrations cellulaires présentent, en surface, un schéma particulier : d'une part, trois stations (S2, R2, R3) avec de fortes valeurs et quatre stations (S1, S2, R1, L) avec des valeurs deux fois plus faibles ; néanmoins, ces valeurs sont, dans l'absolu, si faibles que les différences ne sont pas vraiment significatives. Les indices de diversité ne donnent pas d'indication particulière permettant de dégager un schéma particulier.

En profondeur, les valeurs obtenues sont plus homogènes que celles existant en surface mais restent dans les mêmes gammes de valeurs puisqu'elles varient entre 2000 et 7000 cell./l. Les populations des stations R1, R2, R3, en cette période hivernale pauvre en sels nutritifs, sont essentiellement constituées de cellules mixotrophes, principalement des dinoflagellés tels *Gymnodinium* et *Amphidinium* ; par contre, en S1, S2 et S3, abonde la diatomée planctonique coloniale euryhaline, *Skeletonema costatum*.

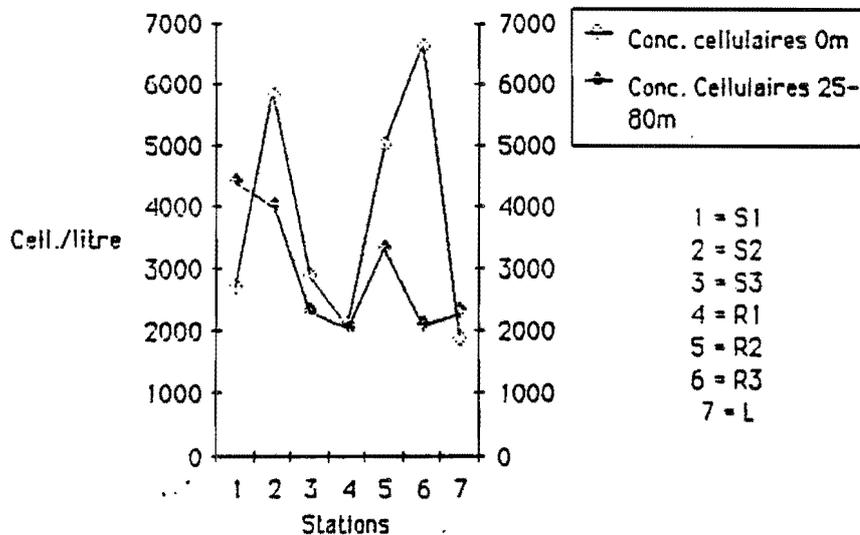


Figure 39 : Concentrations cellulaires en surface et en profondeur en juillet 1984.

5.2.3.1.5. Résultats de novembre 1984

Les populations des eaux de surface sont relativement homogènes et oscillent entre 20.000 et 40.000 cell./l ; elles sont essentiellement constituées de dinoflagellés, principalement des Gymnodinium et des diatomées coloniales, centriques ou pennées, telles Chaetoceros sp. et Nitzschia seriata.

Aux stations profondes, des différences plus importantes apparaissent aux stations côtières : S1 et S3 sont relativement pauvres, 5.000 et 15.000 cell./l, alors que S2 présente 46.400 cell./l en raison d'un fort développement des diatomées. A cette même station S2, le dinoflagellé amphidinium sp. est dominant mais les diatomées sont majoritaires, ce qui explique la valeur assez forte de l'indice de diversité (7,11). Dans les autres stations, l'indice est habituellement inférieur à cette valeur, mais témoigne de l'absence de dominance réelle d'un taxon ou d'un groupe de taxons.

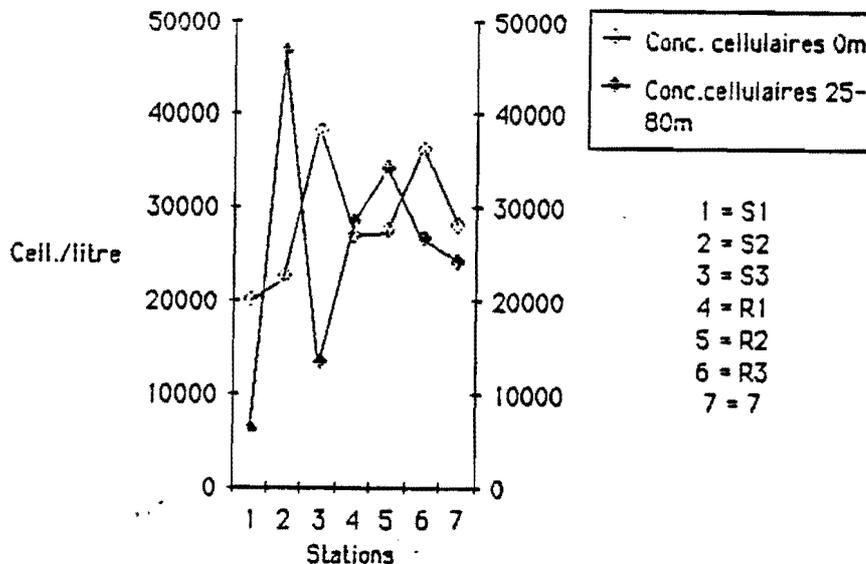


Figure 40 : Concentrations cellulaires en surface et en profondeur en novembre 1984.

5.2.3.2. Discussion

Au travers des divers résultats, il a été possible de mettre l'accent sur quelques aspects intéressants du phytoplancton sur la zone côtière de Taunoa :

- distinction entre stations côtière et océanique,
- rôle prépondérant des apports continentaux et lagunaires,
- importance des formes euryhalines et des formes hétérotrophes-mixotrophes,
- distribution verticale des pigments,
- mauvaises corrélations entre concentrations cellulaires et pigmentaires,
- mauvaise corrélation entre concentrations en sels nutritifs et phytoplancton.

La station L, située le plus au large, se distingue nettement des stations côtières par des concentrations cellulaires et pigmentaires habituellement plus faibles et par une dominance des formes planctoniques, essentiellement des diatomées planctoniques coloniales parmi lesquelles dominent *Nitzschia seriata* et, à un degré moindre, *Chaetoceros* sp. Dans les eaux côtières, les formes phytoplanctoniques sont taxonomiquement plus diversifiées. Les diatomées autotrophes, et les dinoflagellés, mixotrophes à hétérotrophes, se mêlent pour constituer des populations

dont la composition reflète la composition de l'environnement et les diverses étapes des cycles planctoniques. Les formes présentant les plus forts développements sont souvent euryhalines, capables de supporter des variations de salinité liées aux rejets continentaux transitant par les passes, telle Skeletonema costatum. De même, les dinoflagellés mixotrophes-hétérotrophes, tels les Gymnodinium et les Amphidinium, sont capables d'assimiler certaines matières organiques d'origine continentale ou lagunaire, présentes dans le milieu, pour pallier une certaine carence en sels nutritifs.

Cette opposition entre stations océanique et côtière met en évidence, une fois de plus, le rôle prédominant joué par les apports continentaux transitant par les passes. Ces apports, en éléments dissous ou figurés, expliquent la prolifération des diatomées ou des dinoflagellés aux stations les plus côtières, notamment en octobre 1983 et en mars 1984, en fonction de l'extension du panache lagunaire à l'extérieur de la passe. Ce panache est composé d'eaux mixtes, d'origine lagunaire (océanique + lagunaire) et continentale, dont la densité varie en fonction des éléments suivants : température en moyenne sensiblement plus élevée que celle des eaux océaniques, charge minérale dissoute et détritique reflétant la nature et l'importance des apports continentaux, apports phytoplanctoniques reflétant la composition et l'importance des populations lagunaires.

En ce qui concerne la distribution proprement dite du phytoplancton aux diverses stations et aux diverses profondeurs, force est de constater que, dans la plupart des cas, il est difficile de trouver une bonne corrélation entre les facteurs environnementaux et les concentrations cellulaires et pigmentaires : ceci tient tout autant à l'absence de séquences temporelles qu'au fonctionnement très particulier de ces zones côtières. Ainsi, il n'est pas possible de dégager une relation satisfaisante entre les proliférations cellulaires et les concentrations en sels dissous ; de même, les corrélations entre les concentrations cellulaires et les concentrations pigmentaires ne présentent pas les cas les plus fréquents. Il est possible, cependant, d'avancer deux explications pour cet apparent décalage entre les densités cellulaires et les pigments chlorophylliens :

1) présence de fortes populations de dinoflagellés hétérotrophes ou mixotrophes, pauvres ou exempts de pigments chlorophylliens,

2) abondance de cellules nanoplanctoniques, prises en compte dans les dosages de chlorophylle, mais fortement sous-estimées dans les numérations cellulaires (pour éviter ceci, il est nécessaire de réaliser des observations en fluorescence in vivo lors du prélèvement).

La distribution spatiale des cellules et des pigments fait ressortir la plus forte productivité des couches profondes par rapport aux eaux de surface. Ce phénomène est particulièrement net à l'examen des concentrations pigmentaires : les concentrations en chlorophylle a augmentent régulièrement avec la profondeur, à la fois en raison d'une plus forte productivité des eaux, due à une richesse plus grande en sels nutritifs, mais également à la présence croissante de cellules s'enfonçant progressivement depuis la surface. Au niveau de la couche de compensation, vers 80-100 m, les teneurs en pigments dégradés augmentent avec la profondeur pour atteindre, et même dépasser, celles en chlorophylle active, aux stations les plus profondes. Ces observations ne sont pas nouvelles mais soulignent, une fois de plus, la productivité de la couche d'eau aux alentours de 100 m de profondeur.

5.2.4. Le zooplancton

De même que pour les études concernant le phytoplancton, c'est l'antenne de Tahiti du Museum d'Histoire Naturelle qui a été chargée de l'étude du zooplancton au voisinage du site choisi pour l'implantation de la centrale E.T.M. Dans cette étude, l'accent a été mis principalement sur l'observation et la description des migrations nycthémerales (jour - nuit) des populations zooplanctoniques.

Dans le lagon, une première approche des variations nycthémerales a été réalisée par RENON (1978) au cours d'un cycle de 24 heures. Cette étude montre, outre une modification de composition spécifique entre la nuit et le jour, un accroissement important du zooplancton, tant au point de vue de la biomasse (3,4 fois plus) que des effectifs (4 fois plus si l'on exclut deux espèces présentant une richesse diurne anormalement élevée). Toutefois, cette série de prélèvements a été réalisée essentiel-

lement dans le but de compléter une étude de variations quantitatives spatiales du zooplancton à l'intérieur du lagon et ne concernait que la couche superficielle. Les variations d'effectifs alors observées posaient le problème de la localisation diurne des espèces.

Aussi, une étude beaucoup plus générale s'imposait-elle, d'une part, pour confirmer, au cours de plusieurs cycles nycthémeraux, les variations observées, d'une part pour tenter de déterminer l'origine des concentrations nocturnes par des prélèvements à différents niveaux et, d'autre part, évaluer la qualité et la quantité de zooplancton susceptible d'être affectées par le fonctionnement de la centrale.

Dans ce but, deux missions ETM ont été réalisées, la première en juillet 1983, et la seconde en avril 1984. A chacune de ces missions, deux séries de prélèvements ont été effectuées au cours de deux nuits consécutives (les 7/8 et 8/9 juillet, et les 10/11 et 11/12 avril) à un rythme plus ou moins régulier du coucher du soleil au lever du soleil. La cadence horaire ou bihoraire déterminée à l'avance, n'ayant pas toujours pu être respectée en raison de divers problèmes techniques. En outre, disposant déjà de nombreux résultats concernant le plancton diurne, il n'a pas été jugé nécessaire d'effectuer des séries de pêche de jour. Toutefois, quelques prélèvements ont été pris au cours de la journée à titre de repère. Pour la même raison, les récoltes ont commencé avant le crépuscule pour se terminer après l'aube.

5.4.2.1. Lieux et méthodes

Stations et méthodes de prélèvement : quatre stations, échelonnées sur une radiale perpendiculaire au rivage, ont été échantillonnées au droit de Papeete les nuits des 7/8 et 8/9 juillet 1983, et des 10/11 et 11/12 avril 1984 :

- station 0 sur fond de 10 m
- station 1 sur fond de 50 m
- station 2 sur fond de 300 m
- station 3 sur fond de 1000 m

En juillet, les stations 0, 1 et 2 ont été échantillonnées en surface seulement, alors que la 3 était prospectée sur 3 niveaux (surface, 50 m et 200 à 250 m).

En avril, les stations 0 et 1 ont été échantillonnées en surface, la 2 sur deux niveaux (surface et 50 m) et la 3 sur 3 niveaux (surface, 50 m et 250 m).

Afin d'avoir des séries comparables, deux équipes ont travaillé parallèlement, l'une à bord d'un voilier de faible tonnage, qui effectuait les prélèvements les plus côtiers (stations 0, 1 et 2), pendant que l'autre, à bord du N.O. Le Coriolis, prélevait les échantillons de surface et de profondeur à la station 3, la plus large. Au total, 182 échantillons ont été prélevés en deux fois deux nuits. Sur le tableau 12 sont regroupées toutes les indications concernant le nombre de prélèvements par série, leur rythme, les heures de début et de fin, ainsi que les ruptures de cadence au cours de la nuit, ruptures consécutives à divers problèmes techniques (n'ont pas été considérés comme "trous" les écarts entre le dernier prélèvement de la série nocturne et le ou les prélèvements diurnes lorsqu'ils ont eu lieu).

Les pêches ont été réalisées à l'aide de filets type WP2 de 50 à 57 cm de diamètre d'ouverture et 200 μ de vide de maille, traînés à une vitesse de 1,5 à 2 noeuds derrière le bateau. Ces filets sont équipés de compteur de flux. Quatre types ont été utilisés parallèlement : DDR, GO, FM Righosa et digital flowmeter 2030. La technique du trait horizontal ayant été adoptée, les filets furent équipés d'un système d'ouverture/fermeture pour les prélèvements de profondeur. Malheureusement, ce système n'a pas toujours bien fonctionné, et cette technique a été abandonnée et remplacée par celle du double trait oblique. Ainsi, les données quantitatives absolues sont-elles à prendre avec quelques restrictions, notamment pour les prélèvements effectués en début de nuit en avril (station P2 01 et P2 03, et P3 01 ; P3 02 TH3 01 et TH3 02) ainsi que vraisemblablement en juillet (stations 302, 305, 308 à 50 m et 301, 304, 307, 310 à 250 m).

Les filets étaient également équipés d'un enregistreur de profondeur permettant de connaître la profondeur maximale de travail. Ces relevés de profondeur pour la mission de juillet sont donnés dans le tableau 12.

Niveau 1		Niveau 2		Niveau 3	
Echantillon	Prof.	Echantillon	Prof.	Echantillon	Prof.
303	Surface	302	40 m	301	?
306	"	305	60 m	304	200 m
309	"	308	40 m	307	240 m
312	"	311	60 m	310	210 m
315	"	314	50 m	313	200 m
318	"	317	60 m	316	200 m
321	"	320	50 m	319	180 m
324	"	323	50 m	322	250 m
325	"	326	50 m	327	240 m
328	"	330	?		
331	"	330	60 m		

Tableau 12 : Niveau de travail des filets à la station 3 en juillet.

Les échantillons ont été conservés dans une solution à 10 % de formol neutralisé.

Tri et numération du plancton : le tri et les numérations planctoniques ont été réalisés selon les méthodes habituelles (cuve Dollfus, loupe binoculaire) après sous-échantillonnage (méthode de Bourdillon). Une moyenne de 355 individus par échantillon, répartis en 3 à 6 sous-échantillons, a été comptée. Pour l'identification de certains groupes ou espèces, on a également fait des observations au microscope après montage entre lame et lamelles.

Pour accélérer le tri, nous avons souvent regroupé les différentes espèces par famille, ne comptant séparément que les mieux connues ou les plus caractéristiques (ne nécessitant pas d'observation particulière de la P5 par exemple).

Estimation de la biomasse : les mesures de biomasse ont été réalisées selon la méthode de GRANDPERRIN et MICHEL (1969) par pesée du matériel formolé après centrifugation à 60 g pendant 1 mn. Il est à signaler que ces mesures ont été perturbées par l'abondance, à certaines stations, de matériel inerte, organique et minéral : débris d'algues benthiques, détritus divers, morceaux de rouille du bateau, fibre de papier qui, malgré un long tri préalable, n'ont pas toujours pu être totalement éliminés des échantillons. Les biomasses sont exprimées en mg/m^{-3} de poids frais formolé.

5.2.4.2. Rappels climatiques, données météorologiques et hydrologiques

Les deux missions ETM ont été effectuées, l'une en avril, c'est-à-dire à la fin de la grande saison chaude qui s'étend de novembre à avril, l'autre en juillet dans la période des transitions séparant la saison chaude de la saison fraîche. Ces missions correspondent à deux périodes d'abondance moyenne du zooplancton faisant suite aux deux maxima saisonniers (RENON, 1978).

	Juillet 1983	Avril 1984
Température de l'air (moyenne du mois)	24,2°C	27,8°C
Pluies	7/07/83 : 34,5 mm 8/07/83 : 0	10/04/84 : 0 11/04/84 : 0
Vent (moyenne) Maximum	7/07/83 : 5,4 m/s 8/07/83 : 8,9 m/s 7/07/83 : 10 m/s à 0h 8/07/83 : 10 m/s à 5h05	10/04/84 : 2,4 m/s 11/04/84 : 2,8 m/s
Houle	7/07/83 : 1,70 8/07/83 : 2,00	10/04/84 : 11/04/84 :

Tableau 13 : Données météorologiques des deux missions.

	Soleil		Horaire des levers et couchers du soleil et de la lune.
	Lever	Coucher	
7/08-8/9 juillet 1983	6h30	17h37	
10/11-11/12 avril 1984	6h07	17h52	

D'un point de vue climatique, le mois d'avril 1984 poursuit l'évolution du mois de mars, à savoir un temps chaud et ensoleillé. Les températures moyennes sont supérieures aux moyennes habituelles et les pluies sont déficitaires pour la saison.

Le mois de juillet 1983 faisant suite à un régime dépressionnaire en juin est, quant à lui, extrêmement pluvieux. Les conditions météorologiques étaient, lors de la mission, particulièrement mauvaises avec des pluies importantes le 7 et un vent faisant des pointes à 12 m/s au cours de la nuit. La mer, agitée par le vent, le 7, s'est enflée d'une houle de 2 m le 8 (cf. tableau 12).

5.2.4.3. Résultats des campagnes

5.2.4.3.1. Abondance numérique

Les effectifs numériques oscillent en surface entre 101 et 3085 ind./m³ avec une moyenne de 431 ind./m³ en juillet 1983 et entre 207 et 2021 ind./m³ avec une moyenne de 823 ind./m³ en avril 1984.

En juillet, les écarts sont plus importants et les densités presque deux fois plus faibles. Ceci est à mettre en relation avec, d'une part, la période de transition dans laquelle se trouve le mois de juillet et, d'autre part, avec les conditions météorologiques particulièrement mauvaises lors de cette mission.

Tableau 14 : Effectifs totaux du zooplancton : moyenne par séries et par stations (ind./m3).

Stations	0			1			2			3		
Nuit	1	2	Total stations	1	2	Total stations	1	2	Total stations	1	2	Total stations
JUILLET 1983												
Surface												
Nbre observations	9	8	17	9	8	17	7	8	15	6	5	11
Moyenne	723	698	710	255	401	328	234	405	319	298	344	321
Mini-maxi	222-3085	373-1065		111-636	155-661		101-459	161-714		75-461	191-568	
50 m												
Nbre observations										3*	4	7
Moyenne										192	255	223
Mini-maxi										153-242	175-323	
200-250 m												
Nbre observations										2	3	5
Moyenne										29	34	31
Mini-maxi										28-29	18-53	
AVRIL 1984												
Surface												
Nbre observations	16	16	32	8	8	16	5	5	10	5*	5*	10
Moyenne	824	1131	978	712	952	832	626	658	642	534	482	498
Mini-maxi	509-1495	606-2121		483-1076	489-903		368-931	319-856		207-988	302-848	
50 m												
Nbre observations							3*	8		3*	6	9
Moyenne							470	817	523	444	435	438
Mini-maxi							230-570	411-780		395-532	218-577	
250 m												
Nbre observations										3*	6	9
Moyenne										218	138	176
Mini-maxi										202-234	47-187	

*Moyenne obtenue après élimination des prélèvements douteux.

Ces valeurs sont bien supérieures à celles observées dans le lagon par RENON (1978), même en tenant compte du caractère nocturne des prélèvements. Ceci confirme la plus grande richesse des eaux océaniques par rapport aux eaux lagunaires, déjà observée par cet auteur.

Les moyennes par séries, ainsi que les valeurs minimales et maximales de chaque série, sont reportées dans le tableau 14.

Outre quelques variations d'un jour à l'autre, ce tableau met en évidence une décroissance des effectifs de la côte vers le large. Il est à remarquer que cette décroissance se produit différemment pour les deux missions : en juillet, la station la plus côtière (0) s'oppose aux trois autres par ses densités nettement plus élevées (plus du double), alors qu'en avril il y a décroissance graduelle des effectifs de la station 0 à la station 3. Ce phénomène est vraisemblablement lié à la plus grande stabilité hydrodynamique et climatique du mois d'avril permettant une plus grande extension des communautés côtières.

Sur le plan vertical on observe également un appauvrissement de la couche profonde par rapport aux eaux superficielles (0 à 50 m). Cet appauvrissement est plus marqué en juillet qu'en avril, traduisant une limitation également sur le plan vertical de la communauté côtière en juillet.

5.2.4.3.2. Biomasse

Les valeurs de biomasse (tableau 15) oscillent, en surface, entre 8 et 97,2 avec une moyenne de $26,54 \text{ mg.m}^{-3}$ en juillet, et entre 21,1 et 150,7 avec une moyenne de $56,77 \text{ mg.m}^{-3}$ en avril. La plus grande richesse du mois d'avril se vérifie donc également au niveau des biomasses.

La répartition des valeurs de biomasse est similaire à celle des effectifs. En juillet, la station côtière plus riche s'oppose aux trois autres, de biomasse sensiblement identique, alors qu'en avril la décroissance des valeurs de biomasse de la côte vers le large est beaucoup plus progressive.

Par contre, sur le plan vertical, la biomasse moyenne augmente à 50 m de profondeur témoignant de l'importance, à ce niveau, des espèces de grande taille. A 200-300 m, la biomasse, quoique plus faible qu'aux niveaux supérieurs, reste tout de même relativement élevée.

Tableau 15 : Bioasse zooplanctonique : moyennes par séries et par stations (mg/m³ - poids humide).

Stations	0			1			2			3		
Nuit	1	2	Total stations	1	2	Total stations	1	2	Total stations	1	2	Total stations
JUILLET 1983												
Surface												
Nbre observations	9	8	17	9	8	7	9	8	17	6	5	11
Moyenne	34,63	42,78	38,48	18,42	25,43	21,72	17,94	24,01	21,09	22,98	23,06	22,94
Mini-maxi	17,7-90,6	18,3-97,2		6,0-47,8	18,4-37,7		4,5-37,3	17,1-36,7		16,5-30,5	16,7-32,6	
50 m												
Nbre observations										3	4*	7
Moyenne										18,53	22,30	20,69
Mini-maxi										17,9-19,1	15,8-27,8	
200 m												
Nbre observations										2	3	5,08
Moyenne										4,55	5,43	
Mini-maxi										4,5-4,6	4,6-6,7	
AVRIL 1984												
Surface												
Nbre observations	16	16	32	8	8	16	5	5*	10	4	3	7
Moyenne	75,20	82,24	88,72	52,01	51,41	51,71	39,92	33,23	38,94	38,40	27,47	33,71
Mini-maxi	35,5-150,7	45,9-127		39,8-69,2	24,2-78,7		22,6-84,3	27,9-41,5		21,1-80,5	25,0-29,3	
50 m												
Nbre observations							3	8	9	3*	8	9
Moyenne							60,29	51,58	54,45	45,20	41,13	42,49
Mini-maxi							32,3-98,5	38,0-88,8		30,5-69,4	28,6-52,7	
250 m												
Nbre observations										3	5	6
Moyenne										22,73	31,76	28,39
Mini-maxi										18,8-27,2	20,8-68,9	

*Moyenne obtenue après élimination des prélèvements douteux.

5.2.4.4. Résultats des analyses

Les analyses de variance montrent qu'un certain nombre de variations quantitatives observées sont statistiquement significatives et permettent de préciser l'importance de différents phénomènes tels que :

- le **phénomène communauté**, mis en évidence grâce aux interactions stations/espèces lors des comparaisons des stations 0, 1 et 2, tant en avril qu'en juillet. C'est ainsi qu'on peut distinguer :

- . une communauté côtière avec, pour chef de file, Acartia sp., secondé par Labidocera battaviae. Ces deux espèces sont, avec Euterpina acutifrons (beaucoup moins abondante que les deux premières), presque exclusivement localisées dans la frange côtière. Elles sont accompagnées d'autres copépodes présentant une répartition un peu plus large : Paracalanus sp., Undinula vulgaris ainsi que par diverses larves méroplanctoniques : le foraminifère Tretomphalus bulloides, les larves d'annélides polychètes et de décapodes (Lucifer en particulier),

- . une communauté du large, un peu moins individualisée et dominée par les Coryceidae et les Onceidae. Un certain nombre d'espèces secondaires, récoltées presque exclusivement dans les stations 2 et 3, constituent la base de cette communauté ; ce sont des espèces appartenant aux familles des Aetidae, des Euchaetidae et des Metriidae (Pleuromamma spp.), ainsi que des Euphausiaces et des ostracodes. Les Fritillaria moins exclusives présentent toutefois une affinité certaine pour cette communauté,

- . enfin, un certain nombre d'espèces sont plus cosmopolites et ne semblent pas présenter de préférence pour un biotope particulier. Il s'agit des copépodes Calocalanus, Lucicutia, Flavicornis, Candacia sp., Clausocalanus et Oithona sp. (ces deux derniers marquant toutefois une légère affinité pour la côte), des Oikopleura et des chaetognathes et, enfin, des larves de gastéropodes,

- **l'influence de la profondeur** : le facteur profondeur s'est également montré déterminant à travers les interactions espèces/profondeur aux stations 2 et 3 en avril (en juillet ce facteur n'a pu être testé en raison du nombre trop restreint de prélèvements). Rappelons ici que ce facteur, purement indicatif, a été minimisé par la technique de prélèvement (traits obliques). L'influence de la profondeur se manifeste d'un point de vue numérique (diminution des effectifs totaux) mais aussi et surtout d'un point de vue composition spécifique :

. certaines espèces restent essentiellement localisées en surface et leur abondance diminue donc avec la profondeur : ce sont les Coryceidae, les Acanthaires, les Calacalanus et les larves de gastéropodes,

. d'autres présentent un accroissement d'effectifs en profondeur ; ce sont : les copépodes Pleuromamma spp., Lucicutia flavicornis, Scolecithrix spp., Euchada spp., Lubbochia squillimana ainsi que les ostracodes, les euphausiacés et les fritillaires,

- **l'influence du facteur horaire** :

. celui-ci apparaît déterminant en tant que facteur principal, sans présenter d'interaction significative avec les espèces dans deux analyses : en juillet, à la station 2 traitée isolément (4 tranches horaires), et en avril, lors de l'analyse conjointe des stations 0, 1 et 2 (6 tranches horaires ; il semble déterminant dans les différences d'abondance significatives observées au cours de la nuit,

. de plus, le facteur horaire apparaît de nombreuses fois dans des interactions significatives avec le facteur nuit ou espèce. Les interactions heures/nuits sont généralement liées à la présence/absence, ou à l'importance variable des pics d'abondance au crépuscule ou à l'aube : ainsi, l'interaction significative notée en juillet à la station 1 est liée au pic de 18-19 h, celle de la station 0 au pic de 5h50, et celle, déterminée en avril, à la station 0, aux pics de 19h et 5h. Les interactions heures/espèces, en reflétant les évolutions différentielles des espèces au cours de la nuit ont permis, non seulement de mettre une nouvelle fois en évidence les pics d'abondance de l'aube ou du crépuscule,

mais également de déterminer les espèces migratrices. Les graphes visualisant ces interactions significatives ont permis de classer les espèces principales en deux groupes selon qu'elles se concentraient à la tombée de la nuit ou bien qu'elles fluctuaient de manière plus ou moins aléatoire. Il est intéressant de constater que ces deux groupes sont identiques d'une mission à l'autre.

Le premier groupe réunit les espèces "migratrices" : Acartia sp., Labidocera battaviae, Paracalanus sp., les larves de gastéropodes et les larves de décapodes auxquelles s'ajoutent, en juillet, Lucifer (quasi absent en avril) et, en avril, Tretomphallus bulloides (pas rentré dans l'analyse en juillet). Seuls les Oithonidae présentent un comportement différent. En juillet, ils ne présentent pas de pic bien individualisé à la station 1, contrairement à ce qui se passe en avril à la station .

Le deuxième groupe est constitué de toutes les autres espèces : les copépodes, des genres Coryceus, Oncea, Clausocalanus, Calocalanus et Candacia, les appendiculaires Oikopleura et Fritillaria, auxquelles s'ajoutent en avril des espèces non introduites dans l'analyse de juillet en raison de leurs effectifs insuffisants : Acrocalanus, Candacia spp., Lucitutia flavicornis, les Euphausiacés et les Chaetognathes. Toutes ces espèces présentent des fluctuations plus ou moins de caractère aléatoire semblant refléter une microrépartition hétérogène.

- **Des variations journalières** : mises en évidence par les interactions significatives espèces/nuits, tant en avril qu'en juillet, elles concernent essentiellement des variations d'abondance numérique de la quasi totalité des espèces introduites dans les analyses, et sont similaires d'une nuit à l'autre au cours d'une même mission ; par contre, elles diffèrent d'une mission à l'autre.

Si une partie de ces variations d'une nuit à l'autre peut être expliquée par le fait qu'on a probablement "raté", à l'une des deux nuits, les pics d'abondance au crépuscule ou à l'aube en raison des trop grands intervalles de temps entre les prélèvements, ceci n'explique pas toutes les variations observées (par exemple, abondance supérieure des fritillaires ou quasi disparition de Labidocera battaviae à la station 0 au cours de la deuxième nuit en avril). L'origine de ces variations doit donc être recherchée à un autre niveau : par exemple, dans les conditions météorolo-

giques (arrêt des pluies la deuxième nuit en juillet, nébulosité différente, phase lunaire, ...) ou encore dans l'influence de différents facteurs physiques, chimiques ou biologiques (abondance de l'échelon primaire par exemple).

5.2.4.5. Variations quantitatives des espèces : essai de synthèse

Des analyses précédentes se dégagent un certain nombre d'informations sur les variations quantitatives des espèces principales au cours des séries de prélèvements effectuées en avril et en juillet. Nous avons tenté de résumer cette information sur la figure 41 en réalisant une sorte de calendrier horaire : les concentrations les plus significatives observées sur l'ensemble des séries pour les espèces principales ont été figurées aux heures correspondantes par des bâtonnets de longueur proportionnelle à leur abondance. Ce schéma permet de distinguer les maxima liés au crépuscule ou à l'aube de ceux qui sont plus variables ou liés à une distribution diurne. Nous allons discuter cette figure dans un ordre chronologique en débutant par les premiers prélèvements de série, c'est-à-dire un peu avant le coucher du soleil.

- Avant le coucher de soleil, vers 17 h, on note des densités relativement élevées des copépodes Clausocalanus, Coryceus, Acrocalanus et des appendiculaires du genre Oikopleura en particulier.

- Le crépuscule et la tombée de la nuit (18 à 20 h) sont marqués par d'importantes concentrations d'organismes, principalement les copépodes :

. Acartidae dont les effectifs à cette période peuvent être multipliés par un facteur de 17, et même plus (jusqu'à 43 fois) composant alors 40 à 50 % de l'ensemble de la population,

. Oithonidae dont les pics d'abondance n'apparaissent nettement qu'en avril (peut être en raison d'un mélange d'espèces) et qui peuvent alors atteindre 15 à 30 % des effectifs totaux,

. Labidocera battaviae, qui présente des pics d'abondance d'autant plus nets que ses effectifs sont réduits le reste du temps ; il peut alors représenter jusqu'à 20 % de la population totale et provoquer une hausse importante de la biomasse,

. de façon moins régulière : Paracalanus, Undinulla vulgaris,
 . et les larves méroplanctoniques : Lucifer (pouvant représenter jusqu'à 40 % des effectifs). Signalons que cette espèce pourrait présenter des migrations ontogéniques comme le suggèrent les différents décalages entre les pics des stades précoces tels que les protozoés et zoés d'une part, et ceux des mysis et mastigopus d'autre part,
 . les larves de macroures indéterminées,
 . les larves de gastéropodes (jusqu'à 20% des effectifs totaux),
 . et enfin, le foraminifère Tretomphalus bulloides (dans la mesure où l'abondance de cette petite espèce dans nos prélèvements reflète celle dans le milieu).

- Au cours de la nuit, se manifestent des augmentations sporadiques plus ou moins importantes de certaines espèces : les copépodes des genres Oncea, Coryceus, Acrocalanus, Clausocalanus ainsi que les appendiculaires Oikopleurae et, à moindre degré, les ostracodes.

- A l'aube, d'importantes concentrations se manifestent à nouveau : un pic d'abondance apparaît pour presque toutes les espèces à 5h50, dont l'origine est liée au même prélèvement, celui de la station 0 en juillet, le premier jour). La plupart des espèces gardant, au sein de la population, sensiblement la même abondance relative qu'au cours du reste de la nuit, il nous paraît prudent de penser tout d'abord à une erreur d'échantillonnage, diagnostic renforcé par le fait que la plupart de ces espèces n'ont pas présenté d'autres maxima à l'aube dans aucune série. Trois espèces présentent toutefois des augmentations nettes de leur pourcentage lors de ce prélèvement : ce sont Labidocera battaviae, Undinula vulgaris et surtout Lucifer sp. (23 % du zooplancton total) qui semblent donc présenter une deuxième migration à l'aube. Hormis ce cas, les seules espèces pour lesquelles on a relevé des accumulations importantes à l'aube (ou un peu avant, à 4h dans certains cas) sont les larves de décapodes (zoés en particulier) qui atteignent alors facilement 34 à 52 % du zooplancton total.

- Enfin, après le lever du soleil, on retrouve des densités importantes des mêmes espèces qu'en début de série, c'est-à-dire avant le coucher du soleil ; ce sont : Clausocalanus, Coryceus, Oncea, Acrocalanus et, à moindre degré, Oikopleura. Bien que cette distribution semble a priori liée à une abondance diurne supérieure de ces espèces, la quasi absence de prélèvement au cours de la journée ne nous permet pas de conclure. On signalera toutefois que RENON (1978) avait observé que les appendiculaires étaient 38 fois plus importants le jour, et les Coryceidae presque deux fois. Cependant, cet auteur a également montré qu'Acartia était 23 fois plus abondant le jour, ce qui ne l'empêche visiblement pas de se concentrer à la tombée de la nuit. Ainsi, ne faut-il pas écarter l'hypothèse, pour ces espèces, d'une simple microrépartition hétérogène, d'autant plus qu'elles semblent présenter au cours de la nuit des petites concentrations a priori aléatoires.

Conclusions générales

Les deux missions ETM réalisées en juillet 1983 et avril 1984 et concernant les fluctuations temporelles des populations zooplanctoniques à Tahiti, apportent une contribution à la connaissance du zooplancton tropical de cette zone à différents niveaux :

- à un niveau spatial :

. sur la plan horizontal, elles ont permis d'individualiser deux communautés : l'une côtière, sans doute en relation directe avec les populations récifo-lagonaires, l'autre, à affinité nettement océanique ; un troisième groupe d'espèces, sans affinité particulière, grossit ces deux communautés,

. sur le plan vertical, un autre groupe d'espèces presque exclusivement localisées en profondeur a pu être également déterminé,

- à un niveau temporel : des fluctuations quantitatives importantes ont été statistiquement mises en évidence et, là encore, deux groupes d'espèces ont pu être individualisés selon qu'elles présentaient une microrépartition hétérogène ou des migrations nycthémerales. Signalons que ce dernier terme n'est avancé que par référence aux mouvements migratoires bien connus, mais en réalité rien ne nous permet de parler de migrations : nous n'avons mis en évidence que des concentrations importantes de certaines espèces, toujours les mêmes, au crépuscule et/ou à l'aube, rien de plus.

5.2.5. Les peuplements benthiques (RICARD et al., 1981)

5.2.5.1. Peuplements du lagon

Les coraux : sur le récif frangeant, les coraux présentent un recouvrement variable selon la zone considérée. Généralement, jusqu'à 3 ou 4 m de profondeur, les coraux sont bien vivants car le recouvrement varie de 65 à 85 % selon la radiale considérée. Plus bas, apparaît un envasement terrigène intensif et le taux de recouvrement des coraux n'atteint plus que 10 %, le reste étant occupé par la dalle corallienne arasée, ou par des coraux morts.

L'influence humaine est directement observable à l'état de surface des pâtés du récif frangeant : ceux-ci sont érodés et arasés et recouverts d'une couche de sédiments contre laquelle les coraux et les grandes algues ne peuvent pas se défendre en l'absence de courant important.

La zone centrale du lagon, recouverte d'un sédiment sablo-vaseux d'origine terrigène est exempte de toute colonisation par les coraux. Sur la zone barrière, le taux de recouvrement des coraux est important, 40 à 50 %, mais le pourcentage des vivants varie fortement selon la localisation par rapport à la digue. Dans la zone concernée par les travaux d'extension du port, seuls 20 à 50 % des coraux sont vivants alors que dans la partie encore soumise à l'action bénéfique des apports océaniques, ce pourcentage peut atteindre fréquemment 80 %.

Les algues : le développement des algues est principalement fonction de la nature du substrat et de l'importance de la turbidité. Dans la zone du platier de récif barrière les eaux sont claires et la présence d'une flore algale typique s'explique par les entrées massives d'eaux océaniques qui maintiennent les apports turbides au delà du platier corallien. La partie non encore touchée par les travaux est pratiquement à l'état naturel comme en témoigne la présence de nombreuses algues de grande taille comme les *Galaxaura*, les *Avrainvillea* et les *Halimeda*.

Dans la zone remblayée du récif barrière et dans le récif frangeant, l'importance de la turbidité est à l'origine d'une couverture contre laquelle les coraux et les grandes algues ne peuvent pas se défendre en l'absence de courant : ces conditions favorisent le développement de la microflore et en particulier des diatomées benthiques, la diminution de la grosse faune, en particulier celle des poissons, diminue également l'action biologique de nettoyage par ces organismes.

Remarques sur les peuplements benthiques du lagon : la fermeture d'une partie de la barrière récifale par une digue et l'influence de celle-ci et des travaux qui l'ont précédée ont provoqué une "artificialisation" de la pente interne du récif barrière qui s'est traduite par une augmentation de la turbidité et le dépôt d'une fine couche sédimentaire d'origine terrigène. Cette couche sédimentaire, ne pouvant être déblayée par les courants en raison des modifications du régime hydrodynamique du lagon a provoqué, à court terme, une modification partielle des algues et des coraux et le remplacement d'une partie des macrophytes par des espèces d'eau turbide de plus petite taille. Dans le récif frangeant, la turbidité des eaux est à l'origine du même phénomène : mortalité des coraux et disparition des grandes algues au profit d'algues de plus petite taille.

5.2.5.2. Les peuplements de la pente externe

Les observations concernant les peuplements benthiques de la pente externe ont été réduites à une reconnaissance par photographies. Celles-ci ont été réalisées à l'aide d'un bâti supportant une caméra vidéo noir et blanc et une caméra couleur permettant des prises de vues toutes les cinq secondes. Par ailleurs, pour les fonds supérieurs à - 100 m, les clichés ont été effectués par la soucoupe CYANA.

La description des peuplements se limitera aux petits fonds inférieurs à 80 m puisqu'eux seuls sont concernés par le projet.

- **La plateforme supérieure - rainurée** : dans les niveaux supérieurs, on observe de profondes entailles dues à l'action de la houle. Le peuplement corallien est peu dense (30 % de recouvrement et constitué

pour l'essentiel de madréporaires et de coraux lamelleux (Millipora platyphylla). Il existe quelques roches sédimentaires constituées de produits grossiers résultant du démantèlement du récif barrière. Les rainures sont colonisées par des spongiaires et des ascidies.

- **La zone des contreforts et vallons** : celle-ci apparaît vers une dizaine de mètres. Le milieu devenant progressivement moins battu, on assiste à l'apparition en grande abondance (50 à 70 % de recouvrement) des colonies de madréporaires (Acropora - Porites). Le peuplement ichthyologique est riche et varié.

- **La zone des éperons et sillons** : vers 20 mètres le paysage benthique varie peu, et il est dominé par l'abondance (70-80 % de recouvrement) des madréporaires dont les formes en lamelles sont dominantes. Ce paysage se succède jusqu'à une quarantaine de mètres où, progressivement, les madréporaires sont moins nombreux et l'apparition de passées sableuses plus fréquentes.

- **La zone supérieure du genou** : à partir de 60 m, la pente moyenne augmente de façon sensible. Les coraux vivants sont encore nombreux (40 à 50 % de recouvrement) avec une légère augmentation des formes branchues par rapport aux formes en lamelles. La faune ichthyologique y est clairsemée et quelques Gorgoraires font une apparition.

D'une façon générale, ce secteur de l'île présente une faune benthique et ichthyologique assez peu diversifiée et toutes proportions gardées, relativement pauvre.

ANALYSE DES EFFETS SUR L'ENVIRONNEMENT MARIN**1. GENERALITES**

Les effets potentiels sur l'environnement marin, consécutifs à la construction et à l'exploitation d'une centrale ETM sont à l'heure actuelle relativement mal connus car il n'existe pas de centrale en service et que relativement peu de travaux de recherche destinés à mettre en évidence les impacts d'une telle industrie ont été entrepris à ce jour.

Ces impacts peuvent avoir plusieurs origines :

- construction des ouvrages de prises d'eau et de rejet pour les centrales à terre,
- effets des produits destinés à limiter le fouling,
- fuite des fluides de travail,
- entraînement des organismes dans les circuits de la centrale,
- redistribution des masses d'eaux, avec création d'un upwelling artificiel résultant du rejet d'eaux froides profondes riches en éléments nutritifs dans les eaux de surface chaudes et pauvres en sels minéraux.

Dans ce chapitre, on évaluera successivement l'importance des impacts potentiels du projet.

2. EFFETS LIES A LA CONSTRUCTION DES OUVRAGES DE PRISE ET REJET D'EAU

Le projet étudié étant constitué par l'implantation d'une centrale à terre, les ouvrages et conduites destinés à amener l'eau à la centrale et à la rejeter, empièteront pour partie sur le récif-barrière. Leur mise en place nécessitera des travaux de terrassement et de génie civil dont les effets pourront être néfastes pour les organismes vivant au voisinage du lieu d'exécution des travaux.

Parmi les impacts susceptibles d'altérer la faune et la flore on peut distinguer :

- les effets des dragages et excavations exécutés lors de l'ensouillage des conduites,
- les effets liés à l'utilisation éventuelle d'explosifs.

2.1. Effets des dragages et excavations nécessaires à l'ensouillage des conduites

Ce type de travaux peut conduire à deux types d'effets. Le premier est consécutif à la destruction d'une partie du récif corallien entraînant la mort des organismes incapables de fuir (espèces sessiles) ou peu mobiles. Le second a pour résultat la création d'une zone turbide pouvant être néfaste à la flore et à la faune locales.

2.1.2. Destruction d'une partie du récif-barrière

L'aménagement des souilles dans le récif corallien n'intéresse qu'une partie relativement peu étendue du récif puisqu'il est prévu l'excavation d'une tranchée "berlinoise" de quelques mètres de largeur sur 96 mètres de long pour ce qui concerne la prise d'eau froide, et de quelques mètres de largeur sur 300 mètres de long pour le rejet des eaux mélangées dans le cas de la variante dite de référence

La prise d'eau chaude dans la solution n° 1 est constituée par un môle de 45 m de long prolongé par une digue de 45 m parallèle au rivage. La surface circonscrite par cet ouvrage est égale à 2000 m² dragués à la profondeur d'environ - 5 m.

SALVAT et al. (1979) ont décrit l'effet des extractions de sables coralliens dans le lagon de l'île de Moorea. Par analogie, on peut supposer que les effets qui seront observés à Tahiti seront du même type, à ceci près que dans le cas qui nous préoccupe les travaux seront limités dans le temps à une période relativement courte. SALVAT et ses collaborateurs mettent en évidence la destruction totale de la faune et de la flore dans la zone draguée, une baisse importante de la diversité spécifique chez les mollusques, accompagnée de la disparition de certaines espèces telles que Tridacna maxima et des muricidés, ainsi qu'une baisse de la diversité spécifique chez les poissons. Dans ce dernier groupe, la composition des peuplements est modifiée au profit des pomacentridés et des mullidés.

2.1.2. Effets liés à l'accroissement de la turbidité du milieu sur la flore et la faune

La turbidité est le résultat de la présence de matières en suspension dans l'eau tels que des pérites (particules < 50 μ), des matières minérales et organiques, du plancton et d'autres organismes microscopiques. Ces particules interfèrent avec la transmission de la lumière dans le milieu.

La quantité et la nature des matières en suspension dans le milieu marin ont des origines variées telles que les apports par ruissellement, les remises en suspension par les houles et les courants, l'érosion des côtes, ... Les matières en suspension peuvent également provenir de rejets dans le milieu (dragages, rejets domestiques, rejets industriels).

La réponse des organismes à l'augmentation des matières en suspension dans l'eau est généralement difficile à déterminer car les effets sur les organismes peuvent être dus à des causes différentes telles que :

- le nombre de particules en suspension,
- leur densité,
- leur distribution de taille et leur forme,
- leur capacité d'adsorption,
- la présence ou non de matière organique, ...

Dans le cas qui nous préoccupe, les particules sont constituées essentiellement de matériel de petite dimension. Elles sont accompagnées de matériel organique susceptible d'induire une demande en oxygène mais ne transportent pas, a priori, de polluants adsorbés. Les effets de ces particules peuvent donc se manifester par :

- une action mécanique,
- la réduction de la pénétration de la lumière,
- la capacité éventuelle de ces particules à adsorber des polluants.

2.1.2.1. Effets sur la production primaire

De nombreuses études ont examiné les effets de la turbidité et des matières en suspension sur le développement des populations phytoplanctoniques. L'aspect le plus souvent cité est celui qui se réfère à la réduction de l'activité photosynthétique due à l'interférence des matières en suspension avec la pénétration de la lumière.

La majorité des investigateurs qui ont étudié ce problème est finalement arrivée à la conclusion générale que dans la plupart des cas les phénomènes naturels (crues des rivières, remises en suspension par les houles et les courants), avaient des impacts plus importants que ceux provoqués par exemple par des dragages ou des rejets de dragage. En outre, la diminution éventuelle de l'activité photosynthétique du phytoplancton, pourra être compensée partiellement ou totalement par l'introduction dans le milieu de sels minéraux dus au rejet.

2.1.2.2. Effets sur les invertébrés

Les bivalves : il existe un nombre important de travaux qui traitent des effets de l'augmentation du matériel particulaire en suspension sur les mollusques bivalves adultes ; certains travaux récents se sont également intéressés aux larves et aux oeufs de ces organismes.

LUNZ (1938) ne note pas d'effets sérieux sur l'huître américaine dont un gisement était situé à proximité d'opérations de dragage. Aucun effet n'a été constaté sur les larves et les oeufs.

WILSON (1950) soumet des huîtres à des concentrations de matières en suspension variant entre 4 et 32 g/l. Ces concentrations élevées ne deviennent dangereuses pour l'huître que si le temps d'exposition est prolongé.

MACKIN (1956) expose des huîtres à des concentrations en matières en suspension de 100 à 700 mg/l. Aucun trouble particulier n'est noté.

Les bivalves étant des animaux filtreurs, ils sont particulièrement sensibles aux actions mécaniques et abrasives (irritation des tissus, obstruction branchiale, ...) des particules en suspension (CAIRNS, 1968). Plusieurs études ont considéré ce problème et LOOSANOFF et

TOMMERS (1948) ont montré que les huîtres se nourrissaient plus efficacement quand le nombre de microorganismes dans l'eau était relativement faible. En étudiant le taux de pompage des huîtres, ils se sont aperçu que celui-ci diminuait quand la teneur en matières en suspension augmentait.

Sur la coquille St-Jacques (Placopecten magellanicus) STONE et al. (1974) notent que l'exposition de ce bivalve à de fortes teneurs en matières en suspension pouvait modifier l'efficacité de la reproduction, car l'énergie utilisée pour nettoyer les branchies ne pouvait plus l'être pour la gamétogénèse.

PEDDICORD et al. (1975) exposent diverses espèces à des teneurs en matières en suspension différentes. Ils notent que Tapes japonica (palourde) et Mytilus edulis (moule) soumises à des concentrations de 100 mg/l de kaolin présentent respectivement après 10 jours d'exposition 0 et 10 % de mortalité.

Pour ce qui concerne les oeufs et les larves, DAVIS (1960) montre que les oeufs de Mercenaria mercenaria (clam) peuvent se développer normalement dans de l'eau où les concentrations en matières en suspension atteignent 4 g/l. Ils notent toutefois que le pourcentage de développements normaux décroît quand les teneurs en matière en suspension augmentent. Il semble toutefois que 4 g/l soit une limite maximum pour le développement des oeufs et larves de cette espèce.

DAVIS et HIDU (1969) ont montré par ailleurs que le taux de survie des larves de l'huître européenne (Ostrea edulis) était peu affecté par les teneurs en suspension de l'eau.

- Les crustacés : les résultats des expériences faites sur des crustacés sont extrêmement variables. Il a été constaté essentiellement un abaissement du taux de filtration chez les copépodes (Eurytemora affinis et Acartia tonsa) pour des concentrations supérieures à 250 mg/l et 50 mg/l respectivement (SHERK et al., 1976). PEDDICORD et al. (1976) ont montré que 50 % de mortalités pour une exposition de 200 heures apparaissent chez la crevette Crangon nigromaculata, pour des concentrations égales à 50 g/l. Pour les espèces suivantes : Cancer magister (crabe) et Palaemon monodactylus (crevette) ils notent respectivement des taux de mortalité de 50 % pour des concentrations de 32 à 77 g/l. Ils précisent en outre que la survie des organismes est meilleure dans les conditions de basse température, faibles teneurs en matières en suspension et fortes teneurs en oxygène dissous.

- Les colonies coralliennes : les particules en suspension dans l'eau sont défavorables au bon développement des colonies coralliennes ; en effet, de nombreux exemples ont montré que l'augmentation des matières en suspension due aux travaux de dragage et de remblaiements ont des conséquences particulièrement néfastes pour les coraux.

BROCK et al. (1966) ont fait un descriptif détaillé de la destruction des coraux et de la réduction des populations de poissons et d'échinodermes à Johnston Island causées par la remise en suspension de sédiments associée à des dragages. 2800 ha de récifs et de lagon ont été plus ou moins affectés par l'eau turbide et 440 ha de récifs entièrement détruits. La destruction des communautés récifales a persisté plus d'un an après l'arrêt des dragages à cause d'une resuspension continue des sédiments.

JOHANNES (1970) rapporte qu'au cours de la construction d'un aéroport en 1943 à Castle Harbour dans les Bermudes, les opérations de dragages ont été responsables de la destruction, par augmentation de la turbidité, de nombreuses colonies coralliennes. On peut encore actuellement observer des coraux morts de plus d'un mètre de diamètre. En 1969, les sédiments produits par les dragages étaient toujours remis en suspension et aucune recolonisation importante n'était intervenue. A Guam, la remise en suspension de sédiments due à des dragages a détruit les communautés coralliennes "dans de plus larges proportions que celles dues uniquement à l'action des dragues" (MARSH et GORDON, 1974).

D'autres exemples de destruction de coraux par des travaux de dragages ont aussi été observés dans le port de Singapour (JONHSON, 1970) et dans les chenaux adjacents (WYCHERLEY, 1969), aux Seychelles (VINE, 1972) ; à Hawaï (SULLIVAN et GERRITSEN, 1972) ; et dans les Samoa Américaines (SVERDLOFF, 1973). Lorsque les teneurs en matières en suspension ne sont pas suffisamment importantes pour tuer les coraux, ceux-ci présentent une diversité et un taux de croissance réduits.

- Les poissons : la littérature sur ce sujet est abondante. Seules les données les plus significatives et parmi les plus récentes sont exposés ici.

INGLE (1952) étudie l'effet de travaux de dragages sur les poissons dans la baie de Mobile (Alabama). Bien que quelques individus aient évité la zone des travaux, l'auteur n'observe aucun dommage pour les poissons, même à proximité des opérations de dragage (25-50 mètres). D'une façon générale, les poissons évitent les zones où la turbidité est trop importante.

RITCHIE (1970) sur la baie de Chesapeake, n'observe aucune baisse dans la capture de bars, ni aucun accroissement de la mortalité pour des poissons emprisonnés dans des cages à proximité d'une zone où s'effectuent des dépôts de dragage. L'état des branchies avant et après leur séjour dans l'eau ne laisse apparaître aucun dommage.

Des observations analogues ont été faites par FLEMER et al. (1968). Toutefois, des mortalités importantes de poissons ont été observées par KEMP (1949) suite à des crues importantes du Potomac, ayant provoqué l'augmentation de la turbidité (6 g/l) pendant 15 jours.

D'une façon générale, les poissons supportent bien les variations de la turbidité du milieu. Le seuil critique où quelques problèmes peuvent survenir semble se situer aux alentours de 500 mg/l (SCHUBEL et WANG, 1973). Ces auteurs ont réalisé une étude quantitative des effets des matières en suspension dans la baie de Chesapeake sur les oeufs de différentes espèces. Les auteurs concluent des résultats de leur étude que dans la nature, dans un environnement assez bien mélangé, des concentrations en matières en suspension allant jusqu'à 500 mg/l n'affectent pas de façon significative les processus de reproduction des poissons.

Des expériences analogues ont été faites par MORGAN et al. (1973). Ces auteurs aboutissent à des conclusions identiques mais pour des concentrations plus élevées (> 1 g/l).

Il convient cependant de noter que pour une espèce donnée, les oeufs et les stades juvéniles sont plus sensibles que les adultes.

2.1.3. Effets des explosifs

Les changements rapides de pression générés par les explosions peuvent causer d'importantes blessures, voire même entraîner la mort massive de la faune marine. Les lésions graves se situent habituellement au niveau de la vessie natatoire des poissons. Les mortalités susceptibles de se produire chez les poissons dépendent en grande partie de leur poids. Des

animaux pesant entre 0,02 g et 800 g ont été soumis à des conditions d'explosions similaires et les résultats ont montré que le pourcentage de mortalité augmente considérablement quand le poids du poisson est plus faible.

L'effet des explosions sur les oeufs et larves de poissons a été examiné par KOSTYUCHENKO (1973). L'auteur a montré que la survie des oeufs des quatre espèces testées était grandement réduite sous l'effet de petites charges de TNT. Les dommages causés aux oeufs et aux embryons consistaient essentiellement en une déformation et une compression de la membrane de l'oeuf, des déplacement de l'embryon dans sa coque protectrice et des déchirures de la membrane vitelline. Les larves de poissons quant à elles, sont moins sensibles que les oeufs.

YELVERTON et al. (1975) ont proposé un modèle pour déterminer à quelle distance de la charge on peut s'attendre à ce qu'il n'y ait aucun effet sur les poissons. En utilisant ce modèle, on peut montrer que pour une charge d'explosifs placée à 6 mètres de la surface, et pesant 2 kg, la distance minimum pour que des poissons de 200 g ne soient pas blessés est de l'ordre de 200 mètres. Cette distance serait réduite à 120 m pour une charge de 900 g d'explosif.

2.1.4. Ciguatera

Une autre conséquence liée aux dragages et aux divers travaux effectués sur le récif concerne les risques éventuels d'une poussée de ciguatera. La ciguatera est une intoxication alimentaire connue depuis longtemps, consécutive à l'ingestion de poissons de récifs tropicaux, appartenant à des espèces habituellement comestibles, de niveaux trophiques variés, en parfait état de fraîcheur. Cette forme d'ichtyosarcotoxisme est spécifique des régions insulaires tropicales des trois grands océans où son retentissement sur la santé des populations et l'économie locale est parfois considérable. La ciguatera constitue en outre un obstacle à l'exploitation des ressources piscicoles des écosystèmes coralliens, au développement de la pêche artisanale et à celui de l'aquaculture.

Les travaux les plus récents sur le sujet, montrent que cette intoxication alimentaire se manifeste initialement chez les poissons herbivores microphages vivant dans l'environnement immédiat d'un site à forte couverture corallienne vivante, récemment perturbée par l'homme (travaux sous-marins, immersion de matériaux divers, construction de digues ou de wharfs, présence d'épaves sur les récifs, ...) ou soumis à un cata-

clysme naturel (séisme, cyclone, pluies torentielles, tsunamis, ...). Consécutivement à ces événements, on a mis en évidence la prolifération en masse sur les substrats coralliens morts, d'une algue unicellulaire benthique nommée Gambierdiscus toxicus. Cette algue est actuellement considérée comme la source de production toxinique in situ. Le poisson est introduit dans la chaîne alimentaire par les poissons herbivores microphages broutant les algues filamenteuses et calcaires. L'évolution dans le temps et dans l'espace de chaque flambée de ciguatera dépend du mode et de l'importance des agressions subies par l'écosystème corallien, mais il faut savoir que la phase aigüe d'une recrudescence de ciguatera classique couvre en moyenne une période de 10 à 15 ans. Si dans certaines zones la relation entre l'apparition de ciguatera et l'accroissement des agressions humaines sur les écosystèmes coralliens ne fait aucun doute, il faut cependant mentionner que dans d'autres secteurs, tels que les îles Gilbert, les îles Fidji où les typhons sont fréquents, l'atoll d'Eniwitok qui a subi des expérimentations atomiques, l'île Johnson perturbée par d'importants travaux de dragage, on n'a pas remarqué d'aggravation des problèmes de toxicité des poissons.

Les solutions à ce grave problème demeurent actuellement hypothéquées par l'absence d'un diagnostic simple, rapide et fiable de la ciguatoxicité des poissons avant leur commercialisation ainsi que par la mise au point d'une méthode de traitement spécifique ou de prévention de l'intoxication humaine.

3. EFFETS DES PRODUITS DESTINES A LIMITER LE FOULING

La nécessité d'obtenir des échanges de chaleur de haute performance conduit à limiter au minimum les niveaux de biofouling dans les différentes parties de la centrale. Parmi les substances inhibitrices du fouling, le chlore et celle qui est le plus fréquemment utilisée.

3.1. Réaction avec l'eau de mer

Comme le prouve son efficacité, le chlore est un produit nettement toxique pour les organismes marins. Par ailleurs, il peut, lors de son introduction dans l'eau de mer, donner de nombreuses réactions. La concentration en bromure dans l'eau de mer (65 mg/l) étant en effet suffisamment importante pour transformer l'acide hypochloreux (HOCl/OCl^-) en acide hypobromeux (HOBr/OBr^-).

La formation de chloramines et de bromamines dépend des paramètres du milieu, notamment la teneur en ammoniac qui est un fluide de travail potentiel pour le cycle fermé. La consommation du pouvoir oxydant est liée aux réactions qui réduisent cette capacité oxydante. Les études concordent pour observer deux phases dans la dissipation du pouvoir oxydant : une phase rapide durant la première heure et une phase lente, continue et linéaire avec le temps. La première phase est attribuée aux réactions entre l'oxydant résiduel et la matière organique. Les réactions rendant compte de la seconde phase ne sont pas connues. Concrètement, SUGAM et HELZ (1977) observent que plus de 90 % de l'oxydant ajouté dans le condenseur d'une centrale d'énergie disparaît lorsque l'eau émerge du circuit de refroidissement.

La réduction du pouvoir oxydant par la matière organique est un phénomène mal connu. HELZ et al. (1980) montrent que l'oxydation du carbone organique en CO_2 est un mécanisme réactionnel important, rendant compte environ à 60 % de cette consommation. Autre mécanisme réactionnel : la formation de composés organiques halogénés, potentiellement toxiques. La formation des trihalométhanes (CHCl_3 , CHCl_2Br , CHClBr_2 , CHBr_3), substances volatiles, dans une eau soumise à une chloration est un phénomène à présent bien démontré. Dans les eaux douces, le chloroforme est le composé dominant. Par contre, lorsque la salinité dépasse 8 ‰, le bromoforme représente plus de 90 % du total des trihalométhanes formés (HELZ et HSU, 1978). Les mêmes auteurs calculent qu'environ 4 % du chlore ajouté à des eaux d'estuaires conduisent à la formation des trihalométhanes, essentiellement le bromoforme. BEAN et al. (1981) estiment que 0,5 à 5 % du chlore injecté conduit à la formation des trihalométhanes.

Si les réactions inorganiques du chlore sont prédictibles, les réactions organiques ne le sont pas. Des études encore préliminaires indiquent cependant que les nouveaux composés formés pourraient être encore plus toxiques que les formes inorganiques.

3.2. Dégradabilité

Des études ont été réalisées sur la dégradabilité du chlore (pouvoir oxydant résiduel : POR), dans de l'eau de mer chlorée exposée au soleil (MACALADY et al., 1977).

Des échantillons exposés en plein soleil à midi montrent une dégradation de l'ordre de 80 % en moins d'une heure et de 95 % après deux heures d'exposition.

Lorsque l'intensité lumineuse diminue (moins de 20 %) les échantillons présentent une dégradation de 80 % au bout de 2 heures.

Ces opérations montrent donc que le POR diminue rapidement après rejet dans l'eau de mer.

3.3. Toxicité du chlore

Le département américain de l'énergie a fait réaliser une étude sur la toxicité du chlore sur les organismes dans le cadre du projet OTEC (D.O.E., 1979). Cette étude indique que les organismes les plus vulnérables sont constitués par le phytoplancton. Plusieurs auteurs (CARPENTER et al., 1964 ; EPPLEY et al., 1975) ont attiré l'attention sur des baisses importantes et irréversibles de la photosynthèse à des teneurs en chlore inférieures aux limites de détection ($< 0,1 \text{ mg/l}^{-1}$). Il n'existe pas, toujours d'après l'étude du DOE, de données concernant la toxicité du chlore sur les organismes fréquentant habituellement les zones tropicales et intertropicales.

3.4. Taux de rejet

Il n'a pas été effectué d'expériences sur site, concernant l'effet du chlore sur les processus de biofouling. Toutefois des travaux ont été menés à Brest pour parfaire les protocoles d'expérience et juger de l'effet de différentes doses de chlore sur le voile bactérien et les invertébrés responsables des salissures. Ces résultats ne sont cependant pas extrapolables à des eaux tropicales.

Il est probable que les concentrations de chlore injecté seront de l'ordre de 0,2 - 0,5 ppm en discontinu. A cet égard, l'EPA (1976) (Environmental Protection Agency) a édicté des normes réglementant les rejets de chlore d'une durée supérieure à 2 heures. La concentration permise dans le rejet au cours de ces 2 heures est fixée à une moyenne de $0,2 \text{ mg.l}^{-2}$ pendant 30 jours, avec un maximum de $0,5 \text{ mg.l}^{-1}$.

Dans le cas qui nous intéresse, et avec une concentration de chlore égale à $0,2 - 0,5 \text{ mg.l}^{-1}$ à l'injection, les quantités de chlore résiduel dans le rejet seront probablement négligeables au bout de quelques centaines de mètres. Les effets de la chloration sur la faune et la flore seront donc très limités.

4. FUITES EVENTUELLES DU FLUIDE DE TRAVAIL (CYCLE FERME)

Les effets d'un fluide de travail dans le milieu marin est fonction du type de fluide utilisé, du volume de la fuite et de la quantité et qualité de la faune et de la flore vivant au voisinage de la centrale.

Un rejet accidentel d'ammoniac de faible envergure serait sans grand effet sur l'environnement, mais un rejet accidentel de grand volume pourrait provoquer de sérieux dégâts aux alentours de la centrale, sans que l'on puisse à l'heure actuelle, avancer d'hypothèse sur l'ampleur d'un tel évènement. Il est probable que dans ce cas le déversement d'ammoniac contribue à augmenter le pH de l'eau de mer, avec pour conséquence une précipitation massive des carbonates et des hydroxydes métalliques. Il en résulterait également des teneurs en ammoniac dans l'eau susceptibles d'entraver sérieusement les processus de photosynthèse du phytoplancton.

Enfin, les possibilités de combinaison de l'ammoniac avec l'eau de mer pour former des bromamines pourront avoir des effets qui sont actuellement peu connus.

5. REJETS DE METAUX TRACES (GUEZENNEC, 1983)

L'origine des métaux lourds peut être terrestre (eaux de ruissellement, lessivage des roches et sol), aérienne (retombées atmosphériques, aérosol, ...) ou humaine. En effet, les activités humaines peuvent également contribuer à l'enrichissement du milieu en certains éléments par l'utilisation de peintures antifouling (Cu, Sn), de matières plastiques (Pb, Cd) ou encore par la présence de Plomb comme agent antidétonnant dans des essences. Dans le cas de la centrale E.T.M., l'origine des métaux trace pourrait provenir de phénomènes de corrosion ou bien éventuellement de métaux contenus dans l'eau pompée à - 700 m.

La bioaccumulation en quantité excessive de certains de ces métaux le long des chaînes trophiques peut être cause de perturbation et de modification de certains mécanismes élémentaires.

D'autre part, cette bioaccumulation peut également avoir pour conséquence de rendre certains produits du milieu impropres à la consommation.

5.1. Les métaux traces et la corrosion

La présence de certains métaux présents à l'état de traces dans le milieu peut influencer, et de façon notable, sur le comportement de métaux lors essentiellement d'exposition prolongée.

C'est ainsi que le cuivre (DEXTER, 1979) (et peut-être le fer et le mercure) serait susceptible d'initier la corrosion d'alliages d'aluminium et ce à des vitesses de la nature de ces alliages.

Une autre source d'enrichissement du milieu en métaux traces est la corrosion de matériaux dans le milieu. Cette corrosion (dépendante bien sûr de l'alliage considéré) a pour conséquence un relargage dans le milieu d'ions métalliques à des teneurs variables, fonction de la vitesse de corrosion des alliages utilisés.

Si le titane ne semble présenter aucun problème de ce genre, il n'en est peut-être pas de même pour l'aluminium et ses alliages en cas de destruction du film passif, et surtout des alliages de cuivre susceptibles de relarguer dans le milieu des quantités notables d'ions Cu^{2+} .

Il convient de noter également que la plupart de ces éléments traces sont présents dans le milieu marin à l'état de complexes et de composés organiques (40 % du cuivre se trouverait sous forme organique ou chélatée). Il faudra donc tenir compte de la possibilité de destruction de cette matière organique par l'adjonction dans le milieu d'agents oxydants (chlore, hypochlorite, ...).

5.2. Teneurs en métaux dans l'eau sur le site de Tahiti

5.2.1. Cuivre

En surface (- 2 m) les concentrations en cuivre sont comprises entre 0,5 et 1 $\mu\text{g/l}$ avec des maxima au niveau de l'embouchure de la Papaeva et de la passe de Papeete.

Au niveau des stations de rejets, les valeurs obtenues sont du même ordre de grandeur (0,5 à 0,8 $\mu\text{g/l}$).

En station profonde, il est à noter une légère augmentation des teneurs en cuivre (1,4 $\mu\text{g/l}$ - 1,6 $\mu\text{g/l}$ à 1250 m). Les valeurs supérieures obtenues à + 30 m du fond sont probablement causées par une contamination accidentale à un stade quelconque de l'analyse.

5.2.2. Plomb, fer

En ce qui concerne ces deux métaux, les mêmes observations que pour le cuivre peuvent être effectuées, c'est-à-dire des concentrations homogènes en surface et au niveau des stations de rejet (- 100 m) (0,5 à 0,9 $\mu\text{g/l}$ en surface et rejet pour le plomb, 2,3 à 3 $\mu\text{g/l}$ en surface et rejet pour le fer).

Ces teneurs varient sensiblement dans les deux stations profondes étudiées avec une augmentation pour le fer (4 à 5 $\mu\text{g/l}$) et une diminution pour le plomb (0,3 $\mu\text{g/l}$).

5.2.3. Cadmium

Les teneurs en cadmium varient de 0,09 $\mu\text{g/l}$ à 0,03 $\mu\text{g/l}$ en surface et atteignent 0,16 à 0,20 $\mu\text{g/l}$ dans les stations profondes.

5.2.4. Zinc

Les teneurs en zinc présentent une assez grande variabilité due très probablement aux difficultés d'analyses rencontrées pour cet élément.

5.2.5. Mercur

Une certaine homogénéité caractérise ces résultats avec des concentrations de 0,4 µg/l en surface, 0,25 - 0,30 µg/l dans les zones de rejets et 0,25 µg/l en station profonde.

En résumé, l'ensemble des résultats obtenus sur le site montre une légère augmentation de la teneur en métaux avec la profondeur du prélèvement. Ce phénomène est normal et probablement lié à la concentration plus élevée en sels nutritifs des eaux profondes.

Comparés aux données déjà disponibles dans le lagon (tableau 17) on note que les mesures sont du même ordre de grandeur et qu'elles présentent des teneurs en métaux proches des domaines de concentration normalement observées dans les milieux tropicaux. Une exception cependant existe pour le mercure dont les teneurs sont légèrement supérieures aux valeurs habituellement trouvées.

N°	Hydrocar - bures	Fe	Cu	Hg	Pb
STATIONS	$10^{-6}g.l^{-1}$	$10^{-6}g.l^{-1}$	$10^{-6}g.l^{-1}$	$10^{-6}g.l^{-1}$	$10^{-6}g.l^{-1}$
I	1,2	6	2,5	0,28	1,8
II	22	4	3	0,26	7,5
III	15	6	1	0,31	4,8
IV	2,5	5	1,3	0,31	4
V	2,8	3	1,3	0,25	11
VI	2,7	3,5	1	0,37	3
VII	2,7	3	1	0,28	3
VIII	5	2,5	1	0,25	2
IX ¹	8,6	3	1	0,41	2,8
IX ²	9,2	3	1	0,30	3,3
X	13	2	1	0,23	4,3

Tableau 17 : Teneurs en hydrocarbures et en métaux dans le lagon de Tahiti ($\mu g/l^{-1}$).
(in De NARDI et al., 1983).

5.3. Effets potentiels du rejet d'éléments métalliques dans l'eau

Le tableau 18 (MYERS et DITMARS, 1985) résume les résultats d'une expérience faite dans le cadre du projet OTEC. Les concentrations métalliques dans les eaux du rejet sont estimées à environ 100 ng.g^{-1} . Ces faibles concentrations ne seraient pas un problème vis à vis de la qualité du milieu à l'exception peut être du cuivre qui est connu pour sa toxicité vis à vis des organismes marins. Toutefois, les faibles débits de la centrale, associés à des teneurs relativement faibles par rapport à celles observées dans le milieu, ne laissent pas présager d'atteintes graves à l'environnement du site.

Matériel	Nettoyage	Perte de métaux par unité de surface pendant 3 mois (mg/m ²)	Concentration dans le rejet (ng.g^{-1})
ALCLAD 3003 (Al + Zn)	Brosse + chlore	34,30	Al 66 ; Zn 1
5052 AL (Al + Mg + Cr)	Brosse + chlore	10,10	Al 19 ; Mg 49 ; Cr 0.05
CA 706 (Cu + Ni + Fe)	Brosse	87,50	Cu 151 ; Ni 17 ; Fe 2,4
AL 6X (Acier+Fe+Ni+Cr)	Brosse	0,02	Fe 002 ; Ni 0,01 ; Mo 0,002
Ti	Brosse	< 0,01	Ti < 0,02

Tableau 18 : Estimations des pertes métalliques dues à l'érosion et à la corrosion des échangeurs.

6. ENTRAINEMENT DES ORGANISMES DANS LES CIRCUITS DE LA CENTRALE

6.1. Généralités

Les centrales ETM nécessitent, pour fonctionner, d'importants débits d'eau. A titre d'exemple, une centrale ETM consomme près de 100 fois plus d'eau qu'une centrale nucléaire de même puissance. L'impact majeur associé à ces importants débits d'eau froide et chaude, procède de la possibilité qu'ont certains organismes de se trouver aspirés et coincés contre les grilles protégeant la prise d'eau et pour les plus petits organismes de passer au travers de ces grilles et se trouver aspirés dans les circuits où ils peuvent subir des dommages importants tels que des chocs thermiques et des chocs mécaniques.

Dans le cas des centrales ETM, il est possible de distinguer un certain nombre d'impacts que subiront les organismes.

6.1.1. Piégeage des organismes sur les grilles

Cela concerne les organismes, dont la taille est celle de micronecton (2 à 20 cm), et qui incluent des poissons, des crustacés macroplanctoniques, des céphalopodes, des organismes gélatineux comme les méduses, les salpes, les cténaïres, ...

6.1.2. Entraînement dans les circuits

Tous les petits organismes (< 1 cm) entraînés dans les circuits de la centrale seront sujets à des chocs thermiques et mécaniques résultant de changements brusques de pression et de température, de cisaillement par les courants et de forces d'accélération, abrasion et collisions dans les canalisations.

6.1.3. Entraînement secondaire au rejet

L'effet de chasse provoqué par le rejet des eaux pourra entraîner par turbulence une certaine quantité d'organismes vivant dans la masse d'eau environnante. Cet impact est particulièrement difficile à évaluer. Les études sur les phénomènes d'entraînement des organismes dans les circuits ont été généralement menées sur des centrales conventionnelles.

Elles indiquent que la mortalité induite par un tel processus est très variable car elle dépend à la fois de la vitesse de l'eau dans les circuits, des espèces en présence, de leur quantité ainsi que de la saison pour les sites présentant des variations saisonnières marquées. Mais ces études sont compliquées et difficiles à mettre en oeuvre car :

1) le fait même de capturer les organismes peut conduire à augmenter le pourcentage de mortalité mesurée,

2) les méthodes actuelles d'analyses des prélèvements ne permettent pas, à moins d'adopter un plan d'échantillonnage très lourd, de déceler des petites différences,

3) les effets des chocs subis dans les conduites peuvent être subléthaux, c'est-à-dire n'entraîner la mort de l'organisme affecté que quelques heures, voire quelques jours plus tard.

Malgré ces difficultés, les études entreprises sur ce sujet dans les centrales électriques conventionnelles conduisent à considérer qu'environ 10 à 50 % des organismes entraînés sont gravement atteints lors de leur passage dans les circuits. Dans le cadre de l'expérience OTEC 1, des résultats préliminaires et limités ont montré que 100 % des organismes entraînés dans les circuits étaient tués.

6.2. Evaluation des impacts

6.2.1. Piégeage des organismes sur les grilles

L'ampleur de l'impact provoqué par ce phénomène dépend du volume d'eau pompée, de la vitesse d'aspiration et de la quantité d'organismes présents au voisinage de la prise d'eau. Cet impact concerne pour l'essentiel les poissons de taille supérieure à 2 cm. Dans le cas de la centrale ETM de Tahiti, deux phénomènes convergent pour avancer l'hypothèse que l'impact sur les ressources halieutiques du secteur sera relativement limité :

- les débits faibles de la centrale ($8 \text{ à } 10 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la prise d'eau froide et $17 \text{ à } 18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ pour la prise d'eau chaude),

- la zone où est prévue l'installation de la centrale n'est pas très fréquentée par les pêcheurs.

Néanmoins, la vitesse d'aspiration de l'eau est importante et on ne possède pas de données sur l'importance de la faune ichthyologique de la zone concernée, ce qui réduit beaucoup les possibilités d'évaluation de l'impact.

Cette évaluation se fera à partir de données de la littérature (MAYNARD et al., 1975) disponibles pour la région d'Hawaï. Des pêches ont été pratiquées dans ce secteur pour évaluer les ressources halieutiques, en poissons, crustacés et céphalopodes. Les pêches de surface établissent que la biomasse de ces trois groupes est de l'ordre de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ durant le jour et $5,4 \text{ mg.m}^{-3}$ au cours de la nuit.

La biomasse au niveau de la prise d'eau de fond est, quant à elle, estimée à 4 mg.m^{-3} .

En supposant que 40 % de cette population est susceptible d'être piégée du fait de sa taille ou de l'impossibilité qu'elle a d'échapper à l'aspiration, on obtient alors une moyenne d'environ $3,2 \text{ kg.j}^{-1}$ de poids frais piégé sur les grilles du circuit, estimation faite en supposant que les plus gros animaux sont capables d'éviter les prises d'eau.

6.2.2. Entraînement dans les circuits

Cela concerne les organismes planctoniques dont la taille est suffisamment réduite pour passer au travers des grilles de protection. Les organismes susceptibles d'être entraînés dans les circuits peuvent appartenir au phytoplancton ou au zooplancton.

Au voisinage du site, la biomasse moyenne en chlorophylle est proche de $0,2 \text{ mg.m}^{-3}$ dans les eaux de surface. La biomasse susceptible d'être entraînée quotidiennement dans la prise d'eau de surface est évaluée à $311 \text{ g.chlo a.J}^{-1}$. En utilisant un rapport de conversion chlorophylle a / carbone égal à 85 (KING, 1986) on obtient alors une estimation de 26 kg.C.j^{-1} .

De la même façon le zooplancton peut être entraîné dans les circuits de refroidissement. Les études menées à Tahiti montrent qu'il est difficile de mettre en évidence des variations nycthémales du zooplancton et que la biomasse moyenne en poids frais est proche de 40 mg.m^{-3} pour les eaux de surface. En adoptant un coefficient de conversion de 70 % pour la transformation poids frais - poids sec on obtient : 12 mg.m^{-3} soit $3,8 \text{ mg.C.m}^{-3}$. La biomasse susceptible d'être entraînée par la prise d'eau chaude de la centrale sera voisine de 6 kg.C.j^{-1} .

Il n'a pas été effectué d'échantillonnage de zooplancton au voisinage de la prise d'eau froide, c'est-à-dire vers 700 m de profondeur. En effet, à l'origine du projet, celle-ci devait se situer à 900 m. On empruntera donc les estimations de biomasse à cette profondeur à la littérature (HIROTA, 1977 ; UCHIDA, 1983). Biomasse de macrozooplancton environ $0,2 \text{ mg.C.m}^{-3}$, soit une biomasse entraînée chaque jour par la prise d'eau froide égale à 172 g.C.j^{-1} .

6.2.3. Entraînement secondaire du rejet

Cet effet sera probablement peu important dans le cas de la centrale ETM de Tahiti, compte tenu du faible débit d'eau rejetée ($28,8 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

7. REDISTRIBUTION DES MASSES D'EAU

L'originalité technologique de l'ETM par rapport aux systèmes de production conventionnels, conduit à aborder des problèmes nouveaux dans le domaine de l'environnement. En effet, les débits d'eau importants nécessités par ce procédé, ainsi que l'importance de la distance verticale séparant les prises d'eau chaude et d'eau froide, vont favoriser le mélange de masses d'eaux qui, dans la nature, n'auraient jamais dû se rencontrer. C'est ainsi que sur le plan thermique, les effluents froids seront rejetés dans de l'eau de surface chaude, mais aussi que des eaux de caractéristiques chimiques différentes vont être mises en contact, avec comme conséquence, de complexes modifications de l'écosystème marin dont il est difficile actuellement de prévoir l'ampleur. Dans le cadre de cette étude, une tentative a été faite pour cerner les effets d'un rejet riche en nitrates sur la biomasse phytoplanctonique.

7.1. Comportement du panache de rejet

Un certain nombre de travaux sur le comportement du panache de rejet ont été publiés (ALLENDER et al., 1978 ; DITMARS, 1979 ; DITMARS et PADDOCK, 1983). Ces derniers auteurs envisagent un certain nombre de cas différents (centrale à terre ou offshore, types de rejets différents, ...) et parmi lesquels nous avons choisi le cas qui s'adaptait le mieux à notre problème. Dans le cas traité, on envisage le rejet côté océan car la circulation lagonaire est beaucoup trop complexe pour traiter un tel sujet.

7.1.1. 1er cas envisagé

- centrale cycle fermé basée à terre de 5 MWe,
- prise d'eau froide :
 - . profondeur : 700 m
 - . débit : $10,50 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 - . vitesse : $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- prise d'eau chaude :
 - . profondeur : surface
 - . débit : $18,30 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 - . vitesse : environ $1,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.
- rejet (côté océan) :
 - . profondeur : 50 m sur la pente récifale (8°)
 - . rejet type mélangé
 - . débit : $28,80 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$
 - . diamètre du tuyau : 5 m

Les calculs donnant la géométrie et la dilution du panache dans les champs proches et lointains sont développés dans les pages qui suivent.

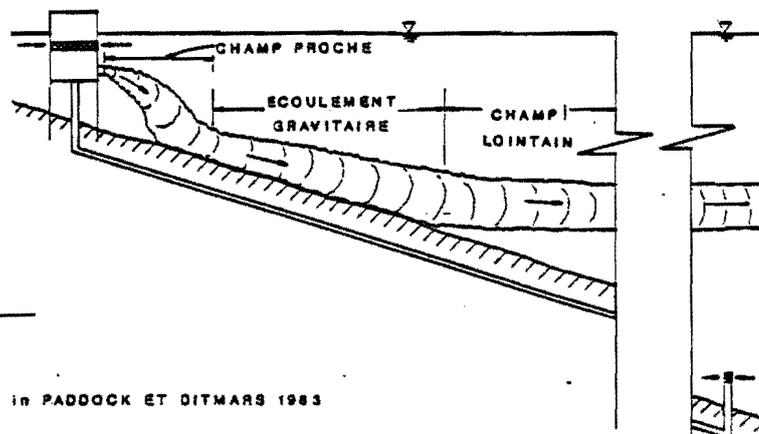


Figure 41 :

IN PADDOCK ET DITMARS 1983

ÉCOULEMENT TYPIQUE DU PANACHE DE REJET

A) Calcul du champ proche pour un tuyau posé sur le fond

U_0 = vitesse à la sortie (m.s⁻¹)

Q_0 = débit (m³/s)

d_0 = diamètre du tuyau (m)

$$\frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} = \frac{\rho_0 - \rho_a}{\rho_a}$$

ρ_0 = densité initiale du jet

ρ_a = densité ambiante

Calcul du nombre de Froude

F_0 = nombre de Froude

$$= \frac{U_0}{\left(\frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} g d_0 \right)^{0.5}}$$

$$x_c = 4,7 F_0 d_0$$

$$\text{Hauteur maximum : } h_{\max} = 0,1 F_0 d_0$$

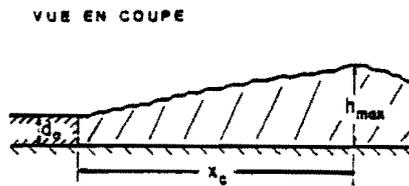
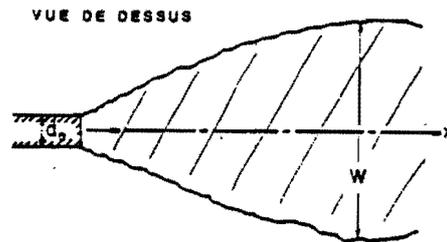
$$\text{Largeur du jet en } x_c = W = 8,5 F_0 d_0 - d_0$$

Dilution moyenne en x_c

$$S + 0,63 F_0$$

Surface affectée par le jet :

$$\frac{A_b}{d_0^2} = (4,7 + 20,0 F_0) F_0 \quad \text{ou} \quad \frac{A_b}{d_0^2} = 20 F_0^2$$



IN PADDOCK ET DITMARS 1983

Figure 42 : Région du champ proche pour un jet à flottabilité négative.

B) Calcul de l'écoulement gravitaire (largeur de l'écoulement supposé constant)

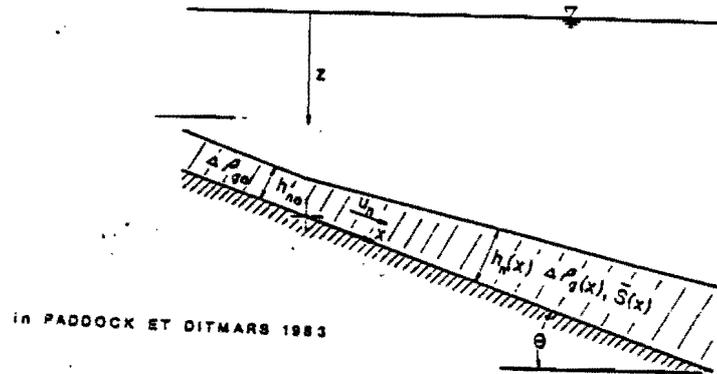


Figure 24 : Ecoulement gravitaire de l'effluent sur le fond.

Densité de l'effluent au début de la pente :

$$\Delta \rho g_0 = \frac{1}{\bar{S}} \Delta \rho$$

On admet qu'il existe un mélange quand l'effluent descend.

$$\text{Pente du platier} = \theta^\circ$$

$$R_{in} = 1,38 \theta^{-0,77}$$

$$E = 0,04 R_{in}^{-0,88}$$

R_{in} = nombre de RICHARDSON

E = coefficient d'entraînement qui dépend de R_{in}

Calcul du flux par unité de largeur = A

$$Q = Q_0 \times \bar{S} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$q = \text{flux par unité de largeur} = \frac{Q}{W} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$A = \frac{\Delta \rho g_0}{\rho_a} g q$$

Epaisseur initiale de l'écoulement :

$$h_{no} = \frac{A^{0,33}}{\left(\frac{\Delta \rho g_0 g}{\rho_a} \right)} \left(\frac{R_{in}}{\cos \theta} \right)^{0,33}$$

Epaisseur le long de la pente :

$$h_n(x) = E_x + h_{no}$$

Dilution le long de la pente à distance x

$$S(x) = \frac{\left(\frac{\Delta \rho_{g0}}{a} g\right) \left(\frac{\cos \theta}{R_{in}}\right)^{0,33}}{A^{0,67}} E_x + 1$$

Vitesse moyenne de l'écoulement gravitaire :

$$U_n = A^{0,33} \left(\frac{\cos \theta}{R_{in}} \right)^{0,33}$$

Différence de densité à la profondeur Z où le jet est supposé se stabiliser :

$$\Delta \rho_{g(z)} = \frac{1}{S(x)} \Delta \rho_{g0} - \left(1 + \frac{1}{S(x)}\right) \frac{\Delta \rho_a}{2} \quad \Delta \rho_a = \text{gradient de densité au-dessous de la couche homogène}$$

profondeur d'équilibre :

$$\Delta \rho_a = \Delta \rho_{g(x)}$$

m = épaisseur de la couche homogène

$$\Delta \rho_a (z - m) = \Delta \rho_{g(x)}$$

$$z = \frac{\Delta \rho_{g(x)}}{\Delta \rho_a} + m$$

C) Champ lointain -> le mélange est dominé par la turbulence océanique
(l'effluent dérive avec le courant ambiant)

1) Loi des 4/3

K = coefficient de mélange

W = largeur initiale du plume

$$K = \lambda W^{4/3}$$

$$\lambda = 0.00046 \text{ m}^{2/3} \cdot \text{s}^{-1}$$

γ = paramètre sans dimension fonction de x

$$\gamma = \frac{K_0 x}{U_a W_0^2}$$

U_a = vitesse du courant
ambiant

à la distance x la largeur du plume est égale à :

$$L = W_0 \cdot (1 + 8\gamma_i)^{3/2}$$

Concentration sur l'axe du plume à la distance x

$$\frac{C_m}{C_0} = \text{Erf} \left[\left(\frac{1.5}{(1 + 8\gamma_i)^3 - 1} \right) \right]$$

Dilution sur l'axe à la distance x

$$\text{Scl}_i = \frac{C_0}{C_m}$$

2) Loi du coefficient linéaire n = 1

$$L = W_0 \cdot (1 + 12\gamma_i)$$

$$\frac{C_m}{C_0} = \text{Erf} \left[\left(\frac{1.5}{(1 + 12\gamma_i)^2 - 1} \right)^{1/2} \right]$$

6.1.2. Application numérique

$$\rho_a = 1.02264 \quad \text{densité ambiante}$$

$$\rho_0 = 1.02455 \quad \text{densité initiale}$$

$$\Delta \rho_0 = \rho_0 - \rho_a = 0,001910$$

$$\Delta \rho(z)_{(150 \text{ m})} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$U = 1,5 \text{ m} \cdot \text{s}$$

$$d_0 = 5 \text{ m}$$

$$Q_0 = 28,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} = 0,0019$$

1) Calcul du champ proche

$$F = \frac{U_0}{\left(\frac{\Delta \rho_0}{\rho_a} g d_0 \right)^{0,5}} = 4,96$$

Distance X_c

$$\frac{X_c}{d_0} = 4,7 F_0$$

$$x_c = 116,6 \text{ m}$$

Hauteur maximum du jet

$$\frac{H_{\max}}{d_0} = 0,1 F$$

$$H_{\max} = 2,48 \text{ m}$$

Largeur du jet en x_c

$$\frac{W}{d_0} = 8,5 F_0 + 1$$

$$W = 216 \text{ m}$$

\bar{S} = dilution moyenne

$$\bar{S} = 0,63 F_o = 3,12$$

$$Q = Q \times \bar{S} = \text{flux volumique à } X_c$$

$$= 28,8 \times 3,12 = 90 \text{ m}^3 \cdot \text{s}$$

Largeur W en $X_c = 216 \text{ m}$

$$q = \text{flux volumique par unité de largeur: } \frac{90}{216} = 0,41 \text{ m} \cdot \text{s}$$

2) Calcul de l'écoulement gravitaire :

a) pas de mélange au cours de la descente sur la pente :

Densité de l'effluent au début de l'écoulement

$$\Delta \rho_{g_0} = \frac{1}{3} \Delta \rho_0 - \left(1 + \frac{1}{3}\right) \frac{\Delta \rho_{z_i}}{2}$$

$\Delta \rho_{z_i}$ = différence de densité entre deux niveaux
 $\Delta \rho_{z_i} = 0$

$$\Delta \rho_{g_0} = \frac{0,001310}{3,12} = 0,00061 \text{ g.cm}^{-3}$$

a) Si pas de mélange (le rejet quittera le fond là où la densité ambiante aura augmenté d'une quantité $\Delta \rho_{g_0}$)

$$\text{soit } \Delta \rho_{z_i} = \Delta \rho_{g_0}$$

$$1,8 \cdot 10^{-5} (Z-50) = 0,00061$$

$$= 34$$

Flottabilité neutre = Z = 84 m

b) Si mélange le long de la pente

$$\text{pente} = 8^\circ$$

$$R_{in} = 0,27 \text{ nombre de RICHARDSON}$$

$$E = 0,017 \text{ coefficient d'entraînement qui dépend de } R_{in}$$

$$\frac{(\cos \theta)^{1/2}}{R_{in}} = 1,535$$

$$= \frac{(0.0006 \cdot 9.81) (1.535)}{0.019} \quad E.x+1$$

$$= (0.48 \times 0.067) \times +1$$

$$= (0.6081) \times + 1$$

$$\bar{S}_{(40)} = (0.6081 \times 40) + 1$$

$$\approx 1,32$$

Différence de densité sur la pente à Z = 70 m

$$\Delta \rho_{g(z)} = \frac{1}{S} \Delta \rho_{g_0} - \left(1 + \frac{1}{S}\right) \frac{\Delta \rho_a}{2}$$

$$= \frac{0.00061}{1.32}$$

$$= 0,000462 \text{ g.cm}^{-3}$$

Profondeur de flottabilité neutre :

$$1,8 \times 10^{-5} \cdot (Z - 50) = 0,000349$$

$$= 25,6$$

$$Z = 75,6$$

$$\approx 76 \text{ m}$$

3) Calcul du champ lointain

$$W = 216 \text{ m}$$

$$U = 0,15 \text{ m.s}$$

K_0 = coefficient de mélange turbulent

$$K_0 = \alpha W^n$$

1) Pour $n = 1$

$$K = W_o^{4/3} = 0,00046.216^{4/3} = 0,58 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\gamma = \frac{K_o x}{U_a W_o^2} \quad U_a = 0,15 \text{ m/s}$$

$$= 8,3 \cdot 10^{-5} x$$

où x est exprimé en mètres.

A la distance x du début du champ lointain :

x (en m)	γ	12γ	$\frac{L}{W_o}$	L	$\frac{C_m}{C_o}$	Scl dilution
500	0,042	0,50	1,50	324	0,88	1,14
750	0,062	0,74	1,74	377	0,77	1,30
1000	0,083	1,00	2,00	431	0,68	1,47
2000	0,166	2,00	3,00	646	0,45	2,22
3000	0,249	3,00	4,00	861	0,32	2,94
4000	0,332	3,98	4,98	1076	0,25	3,61

Tableau 19

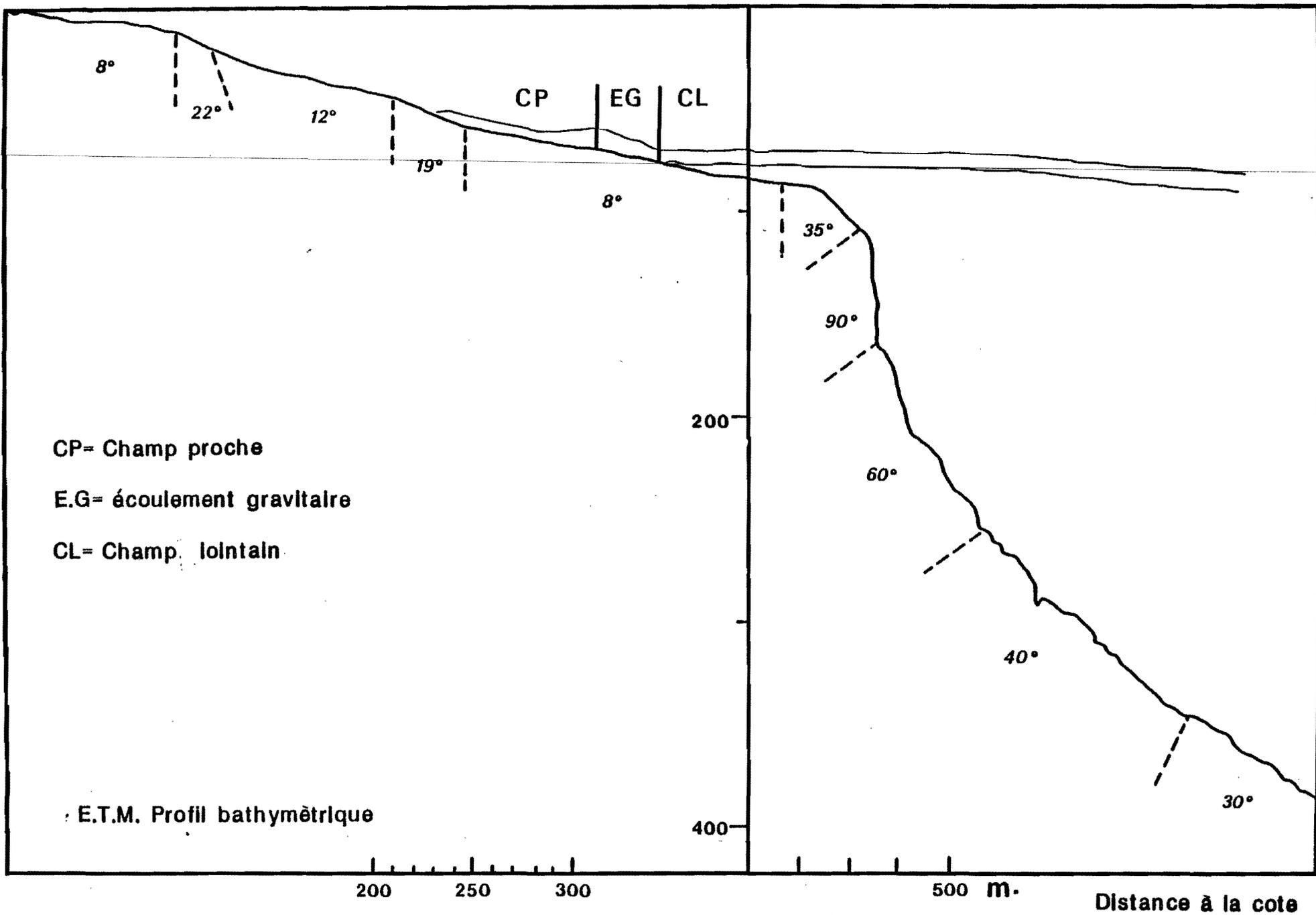
2) Pour $n = 4/3$

$$\begin{aligned} K &= \alpha W_o^{4/3} \\ &= 0,00046.216 \\ &= 0,58 \text{ m} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\gamma = \frac{K_o x}{U_a W_o^2} = 8,3 \times 10^{-5} x$$

Fig.44

SCHEMATISATION DU PANACHE DE REJET



A la distance x du début du champ lointain :

x (en m)	γ	8γ	$\frac{L}{W_0}$	L	$\frac{C_m}{C_0}$	Scl dilution
500	0,042	0,34	1,55	355	0,83	1,20
750	0,062	0,50	1,84	397	0,74	1,35
1000	0,083	0,66	2,14	462	0,64	1,56
2000	0,166	1,33	3,56	768	0,39	2,56
3000	0,249	1,99	5,17	1116	0,26	3,84
4000	0,332	2,66	7,00	1512	0,17	5,60

Tableau 20

Ce panache est schématisé sur la figure 44.

Le champ proche atteint une centaine de mètres et une largeur de l'ordre de 200 mètres. A l'extrémité du champ proche la dilution du panache est de 3. Le panache s'écoule par la suite par gravité et il atteint sa profondeur d'équilibre après mélange avec la masse d'eau environnante à 76 mètres. A partir de ce moment on considère que l'on se situe dans le champ lointain et que le comportement du panache dépend de la turbulence du milieu et des courants locaux.

A titre d'exemple, à 4000m du début du champ lointain, soit à 4136 m du le point de rejet, la largeur du panache est égale à 1076 m et sa dilution égale à 15 pour un coefficient de diffusion linéaire $n = 1$.

7.1.2. 2ème cas envisagé

- centrale cycle fermé basée à terre de 5 MWe,
- prise d'eau froide :
 - . cf. §7.1.1.
- prise d'eau chaude :
 - . cf. §7.1.1.
- rejets (rejets séparés) :
 - . d'eau chaude : profondeur : 15 m sur la pente récifale
 - débit : $19,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
 - température : $25,7^\circ\text{C}$
 - diamètre du tuyau : 3 m
 - . d'eau froide : profondeur : - 50 m
 - débit : $10,5 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$
 - température : $10,3^\circ\text{C}$
 - diamètre : 2,8 m

En appliquant des calculs, identiques à ceux exposés dans le paragraphe précédent, on obtient :

A) Pour le champ proche :

- $X_c = 59,2 \text{ m}$
- $H_{\text{max}} \text{ en } X_c = 1,15 \text{ m}$
- largeur du jet en $X_c = 110 \text{ m}$
- dilution moyenne $S = 3,03$

Profondeur de stabilisation du panache :

- avec mélange $Z = 103 \text{ m}$

B) Pour le champ lointain - Rejet eau froideSi $n = 1$

x (en m)	γ	12 γ	$\frac{L}{W_0}$	L	$\frac{C_m}{C_0}$	Sci dilution
500	0,007	0,85	1,85	185	0,73	1,37
750	0,105	0,26	2,26	226	0,65	1,65
1000	0,140	1,68	2,68	268	0,51	1,96
2000	0,280	3,36	4,36	436	0,31	3,22
3000	0,420	5,04	6,04	604	0,22	4,54
4000	0,560	6,72	7,72	772	0,17	5,88

Tableau 21

Si $n = 4/3$

x (en m)	γ	12 γ	$\frac{L}{W_0}$	L	$\frac{C_m}{C_0}$	Sci dilution
500	0,065	0,52	1,87	206	0,720	1,39
1000	0,130	1,04	2,91	320	0,475	2,11
2000	0,260	2,08	5,41	555	0,250	4,00
3000	0,390	3,12	8,36	920	0,170	5,88
4000	0,520	4,16	11,72	1289	0,112	8,93
5000	0,650	5,20	15,44	1698	0,090	11,11
6000	0,780	6,24	19,48	2143	0,07	14,29

Tableau 22

7.2. Modélisation des effets du rejet E.T.M. sur le phytoplancton marin

(A. MENESGUEN)

L'écologie pélagique des zones océaniques telles que la région de Tahiti est conditionnée par la permanence d'un climat chaud et ensoleillé. La première conséquence est en effet l'établissement d'une thermocline stable, constituant une sorte de barrière permanente à l'alimentation des eaux de surface par les sels nutritifs contenus en abondance dans les eaux profondes : les 200 ou 300 premiers mètres sous la surface constituent donc une zone très oligotrophe, environ 10 à 20 fois moins riche que les eaux de la Manche par exemple. La seconde conséquence est l'existence de conditions lumineuses et thermiques idéales pour la croissance du phytoplancton, et ce sur une épaisseur de plus de 100 mètres du fait de la transparence de l'eau. On voit donc que le système s'autolimité très vite, puisque plus le climat est favorable à la photosynthèse, moins les algues trouveront à leur disposition les éléments autres que le carbone dont elles ont besoin pour se multiplier (azote, phosphore, silicium). De fait, les zones océaniques intertropicales sont parmi les moins productives, sauf s'il existe des apports terrigènes locaux, ou bien encore un mécanisme local brisant la thermocline et permettant donc un réapprovisionnement des eaux de surface en sels nutritifs ; ce mécanisme existe à l'état naturel le long de certaines côtes : il s'agit des upwellings créés par des vents parallèles aux côtes Nord-Sud. A une échelle infiniment plus modeste une centrale E.T.M. crée également un upwelling artificiel, et l'on peut dès lors s'interroger sur l'ampleur de la stimulation ainsi apportée à l'écosystème pélagique de surface. Pour prendre en compte les mécanismes biologiques et physiques simultanés, un modèle numérique simple s'avère un outil quasi-indispensable, et il permet en outre de tester assez facilement plusieurs scénarii de rejet. La première étape consiste à calibrer un modèle des traits écologiques majeurs de l'écosystème pélagique naturel, la seconde à connecter ce modèle écologique à un modèle simple de panache de dilution du rejet.

7.2.1. Modèle de la structure verticale de l'écosystème planctonique au large de Tahiti

Le trait majeur, maintes fois étudié, de ces écosystèmes est leur structure verticale liée, comme on l'a dit, à la pénétration verticale de l'énergie solaire incidente. La biomasse phytoplanctonique, mesurée par son contenu chlorophyllien, est peu abondante en surface, puis augmente pour

passer par un maximum vers 80-100 m de profondeur à Tahiti, pour finalement disparaître aux grandes profondeurs totalement obscures. Les sels nutritifs, particulièrement les nitrates et les phosphates, sont par contre presque absents des premiers cent mètres, puis réapparaissent graduellement quand on s'enfonce (nitracline). Plusieurs mécanismes concomitants ont été invoqués pour expliquer cette structure verticale : CULLEN (1982) distinguerait ainsi quatre types de maxima de chlorophylle de sub-surface. Le premier, correspondant à la "Typical Tropical Structure" définie par HERBLAND et VOITURIEZ (1979) dans l'Atlantique intertropical, serait bien un pic de biomasse algale situé au croisement des deux gradients verticaux opposés, de lumière et de sels nutritifs ; la profondeur de ce type de maxima serait assez modérée, entre 30 et 50 m. Le second type se rencontrerait par contre plus en profondeur (100-150 m) en zones océaniques très oligotrophes et ne correspondrait pas à un pic de biomasse mais simplement à un pic de contenu cellulaire en chlorophylle lié à l'adaptation connue des cellules à la pénombre. Le troisième type serait dû à l'accumulation de cellules dénutries sédimentant depuis la surface et ralentissant leur chute à mesure qu'elles se rechargent en sels nutritifs au contact de la nitracline. Enfin, le quatrième type fait appel à une accumulation active de cellules le long d'un front entre deux couches d'eau plus turbulentes. Il semble que la situation observée à Tahiti soit hybride et fasse intervenir probablement les trois premiers mécanismes : effet combiné de deux gradients trophiques tête-bêche (lumière et sels nutritifs), adaptation du continu pigmentaire et sédimentation. Le modèle numérique qui a été construit pour tenter de reproduire cette structure verticale se compose d'une partie physique couplée à une partie biologique.

7.2.1.1. La partie physique

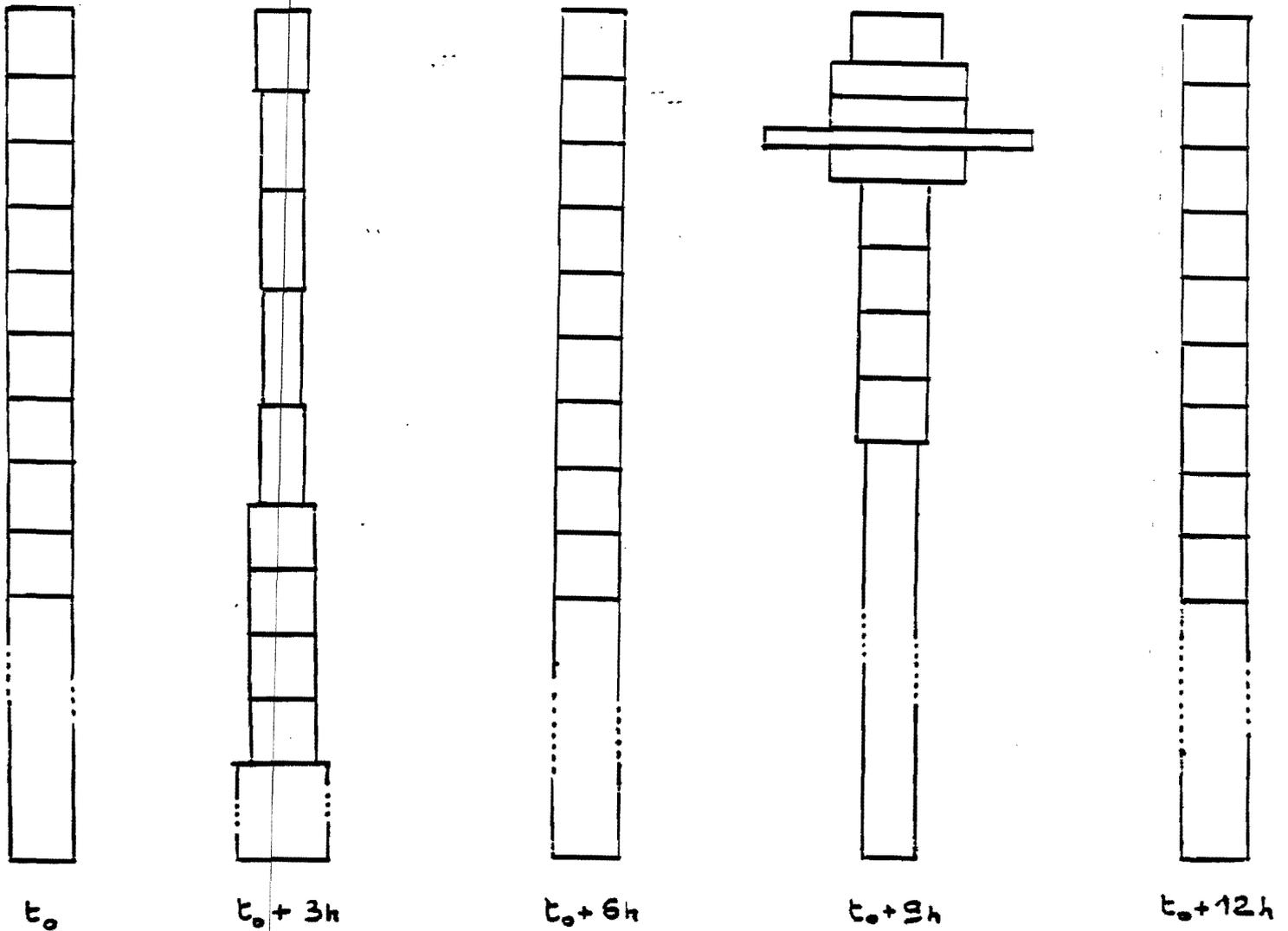
Destinée à simuler les phénomènes de dispersion verticale et à reproduire les gradients verticaux résultants, cette composante physique prend la forme d'une colonne de 10 boîtes superposées, les 9 premières faisant 20 m d'épaisseur et la dernière 220 m. Dans le cas étudié, on considèrera que l'advection verticale est nulle et que seule joue la dispersion turbulente verticale ; si K_z est le coefficient associé, le flux dispersif échangé entre la boîte i et la boîte $i+1$ peut s'écrire pour le constituant C :

$$F_{ij} = K_z \frac{S_{i,i+1} \times |C_i - C_{i+1}|}{\Delta z_{i \rightarrow i+1}} \quad \text{Si, } i+1 = \text{Surface de contact entre les boîtes}$$

$$\Delta z_{i \rightarrow i+1} = \text{Distance entre le centre des boîtes}$$

LE MODELE PHYSIQUE

Une colonne d'eau de 400 metres



Termes physiques des equations (dispersion)

Boite 1	$\frac{dX_1}{dt} = -K_2 \cdot \frac{(X_1 - X_2)}{h_1 \cdot \Delta z_1}$
Boite 2	$\frac{dX_2}{dt} = -K_2 \cdot \frac{(X_2 - X_1)}{h_2 \cdot \Delta z_1} - K_2 \cdot \frac{(X_2 - X_3)}{h_2 \cdot \Delta z_2}$
⋮	
Boite 10	$\frac{d}{dt} = -K_2 \cdot \frac{(X_{10} - X_9)}{h_{10} \cdot \Delta z_9}$

Fig.45

Par définition, le flux dispersif est non-directionnel. Pour les constituants particuliers, il existera en plus un flux de sédimentation, dirigé de haut en bas.

Pour simuler les oscillations verticales des particules dues aux ondes internes connues autour de Tahiti, cette colonne de 10 boîtes sera susceptible de se déformer au cours du temps, les interfaces montant et descendant selon les mouvements sinusoidaux en phase, de période 12 heures, étant donné que la fondamentale de ces ondes internes est de même période que le phénomène excitateur, ici la marée. Pour respecter grossièrement l'allure de cette oscillation barocline de la colonne d'eau, dont l'influence est encore très nette à 1000 m de fond, les amplitudes des oscillations ont été fixées à :

- 5 m pour l'interface à - 20 m,
- 15 m pour l'interface à - 40 m,
- 25 m pour l'interface à - 60 m,
- 40 m pour l'interface à - 80 m,
- 50 m pour les interfaces au-dessous de - 80 m.

La figure 45 montre trois situations successives de la colonne d'eau. Le cadre physique sera enfin complété par la donnée des variables forçantes Température et Eclairement moyen en surface : 277 W/m² pendant 12 heures sur 24 (tableau 23).

0-20	20-40	40-60	60-80	80-100	100-120	120-140	140-160	160-180	180-400
27	27	26	26	26	25	24	23	22	17°C

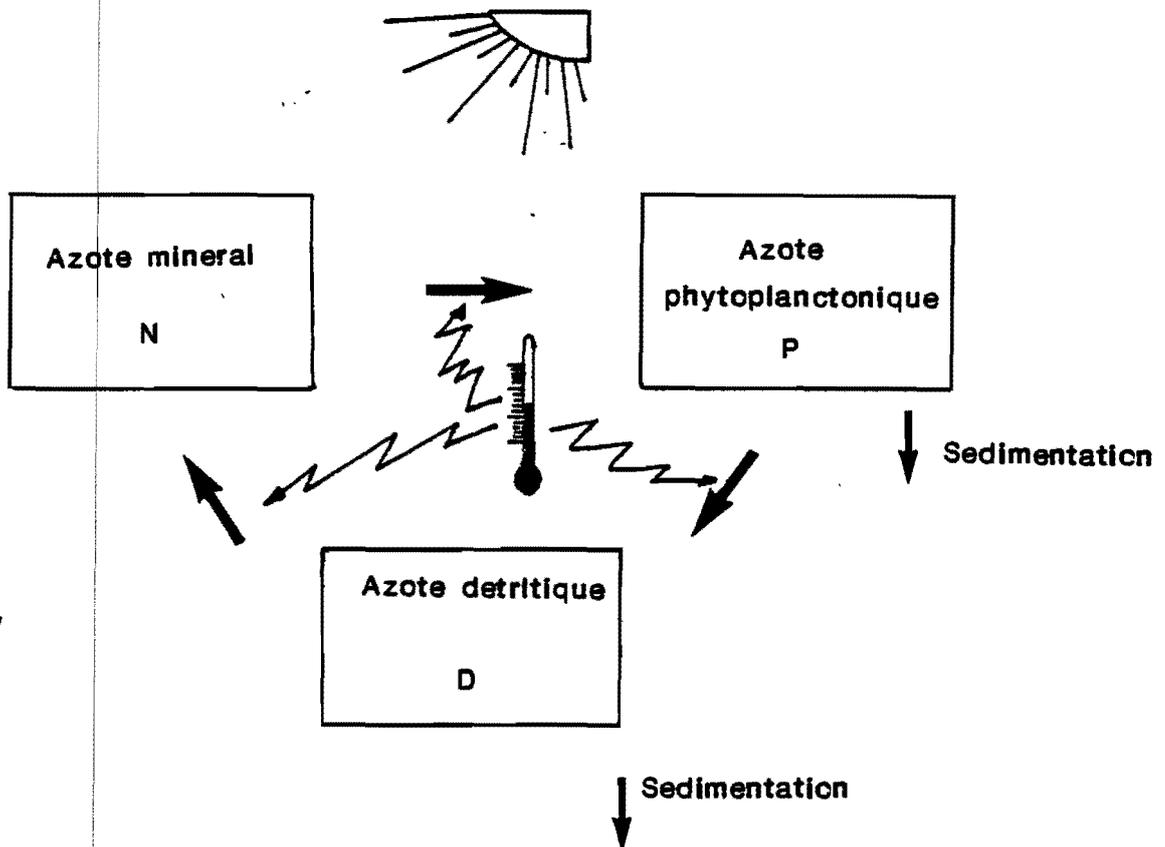
Tableau 23

7.2.1.2. La partie biologique

Etant donné que la plupart des auteurs ayant étudié le plancton des zones océaniques du Pacifique (EPPLEY et al., 1973 ; EPPLEY et al., 1977 ; LAWS et al., 1984) ont considéré que c'était l'azote qui était le premier élément nutritif limitant, c'est un modèle biologique simple du cycle de l'azote qui sera utilisé. Une confirmation que le phosphore et le silicium ne sont pas limitants peut toutefois être trouvée dans les mesures

LE MODELE BIOLOGIQUE

Cycle de l'Azote a trois compartiments



Termes biologiques des equations

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dN}{dt} = r \cdot e^{\alpha \theta} \cdot D - \mu \cdot e^{\alpha \theta} \cdot f(i) \cdot \frac{N}{K+N} \cdot P \\ \frac{dP}{dt} = \mu \cdot e^{\alpha \theta} \cdot f(I) \cdot \frac{N}{K+N} \cdot P - m \cdot e^{\alpha \theta} \cdot P \\ \frac{dD}{dt} = - \frac{dN}{dt} - \frac{dP}{dt} \end{array} \right.$$

Effet limitant de la lumiere : $f(i) = \frac{1}{24} \int_0^{24} \frac{I(t)}{I_{opt}} \cdot \left[1 - e^{-\frac{I(t)}{I_{opt}}} \right] \cdot dt$

Fig.46

de GUNDERSEN et al. (1976) au large d'Hawaï. Le modèle biologique le plus simple est celui d'un cycle à trois compartiments pélagiques : l'azote minéral total, l'azote organique phytoplanctonique et l'azote organique détritique (figure 46). Dans chacune des 10 boîtes du modèle vertical, la composante strictement biologique (interne à la boîte en question) de l'évolution des trois compartiments azotés pourra se formuler par le système différentiel suivant :

$$\begin{aligned}
 - \quad & \text{azote minéral} : \frac{dN}{dt} = r.D - \mu P \\
 - \quad & \text{azote phytoplanctonique} : \frac{dP}{dt} = (\mu - m)P \\
 - \quad & \text{azote organique détritique} : \frac{dD}{dt} = mP - r.D
 \end{aligned}$$

Le taux de reminéralisation r de l'azote détritique, ainsi que le taux de mortalité m du phytoplancton seront considérés comme augmentant exponentiellement avec la température. Le métabolisme bactérien d'une part, celui des prédateurs du phytoplancton (zooplancton variés) d'autre part sont en effet connus pour réagir exponentiellement à la température. La formulation sera donc la suivante :

$$m_{\theta} = m_{0^{\circ}} \cdot \exp(\alpha \cdot \theta)$$

$$r = r_{0^{\circ}} \cdot \exp(\alpha \cdot \theta)$$

Si on admet qu'une élévation de température de 10°C double le métabolisme, on prendra pour la valeur 0,07 degré⁻¹.

Le taux de croissance μ du phytoplancton est fonction de la température (dépendance exponentielle), de la lumière disponible (dépendance avec optimum, selon la loi de Steele) et de la teneur de l'eau en azote minéral (dépendance michaelienne) :

$$\mu = \mu_{\max} \text{ à } 0^{\circ} \times \exp(\alpha \cdot \theta) \times \frac{N}{K + N} \times \frac{I}{I_{opt}} \times \left[1 - \exp\left(-\frac{I}{I_{opt}}\right) \right]$$

K est la constante de demi-saturation pour l'azote

I_{opt} est l'intensité lumineuse optimale pour le phytoplancton local

I est l'intensité lumineuse à la profondeur z, et s'obtient à partir de l'intensité disponible en surface (I_0) en utilisant le coefficient d'extinction k :

$$I = I_0 \cdot \exp(-k \cdot z)$$

7.2.1.3. L'estimation initiale de la valeur des paramètres

Avant toute calibration du modèle sur les mesures faites à Tahiti, il faut fixer l'ordre de grandeur des paramètres du modèle :

- pour le coefficient de dispersion K_z , LAWS et al. (1984) proposent $2,8 (+ 1,3) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 / \text{s}$ près d'Hawaï,

- pour le coefficient d'extinction k, une remarquable concordance existe entre plusieurs auteurs :

- de 0,03 à 0,033 m^{-1} près des îles Hawaï (BIENFANG & GUNDERSEN, 1977),

- 0,031 m^{-1} dans le tourbillon central du Pacifique Nord (EPPLEY et al., 1973),

- 0,033 m^{-1} au large d'Hawaï (GUNDERSEN et al., 1976),

- pour la vitesse de sédimentation, des articles synthétiques (EPPLEY et al., 1967 ; SMETACEK, 1985) montrent la grande variabilité des vitesses de chute disponibles. Au large d'Hawaï, BIENFANG (1985) donne 0,22 m.jour^{-1} pour l'azote particulaire,

- pour le taux de reminéralisation de l'azote organique détritique, extrapolé à la température théorique de 0°C, on prendra la valeur de 0,018 j^{-1} , dérivée des résultats de

- pour le taux de mortalité totale du phytoplancton, il faut cumuler la lyse naturelle des cellules sénescents, pratiquement jamais mesurée, avec la prédation par le zooplancton herbivore,

- pour le taux de croissance maximum extrapolé à 0°C, EPPLEY (1972) propose, dans une revue synthétique de travaux portant sur plusieurs espèces, de prendre 0,59 j^{-1} comme valeur maximale,

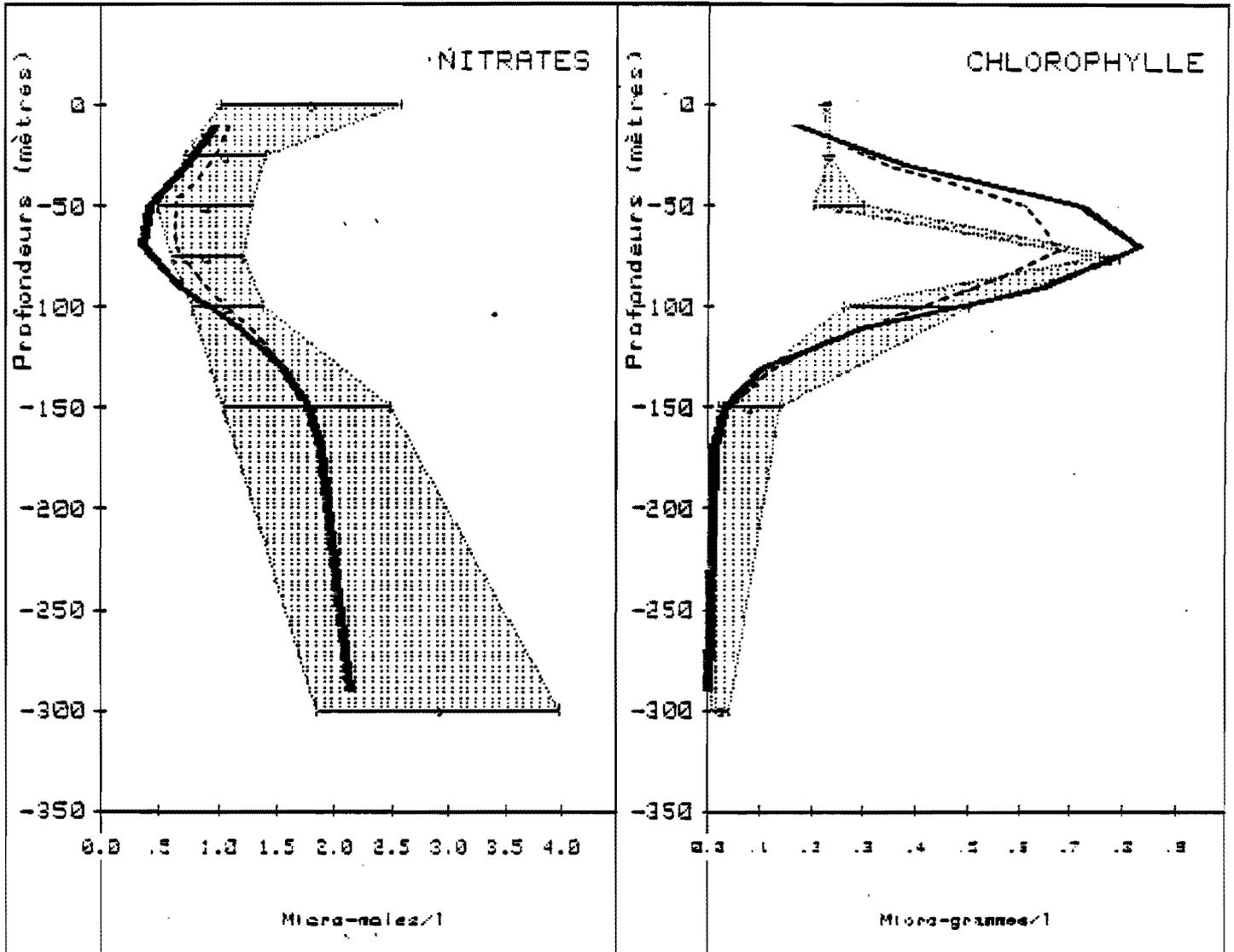


Fig.47 PROFILS DE NO₃ ET DE CHLOROPHYLLE a
POINTILLES-AVEC ONDES INTERNES
CONTINU-SANS ONDES INTERNES

- pour l'intensité optimale I_{opt} , il faudra choisir une valeur intermédiaire entre l'intensité optimale élevée de cellules adaptées à un éclairage de surface (240 W/m^2 dans le Pacifique Nord selon KIEFER et al. (1976) et l'intensité très faible de cellules vivant vers 100 m de fond (28 W/m^2 selon les auteurs précédents). Par ailleurs, I_{opt} devra aussi représenter une moyenne des états physiologiques traversés par une cellule qui peut être déplacée en 12 h sur une tranche d'eau de 80 à 100 m par les ondes internes. EPPLEY et al. (1973) ont ainsi mesuré dans le tourbillon très oligotrophe du Pacifique Nord une intensité optimale de l'ordre de 25 % de l'intensité moyenne de surface pour le phytoplancton habitant les 60 premiers mètres, tandis que celui situé au niveau du maximum de chlorophylle local (vers 100 m) était adapté aux intensités de l'ordre de 5 % de l'intensité de surface. En considérant que l'intensité lumineuse moyenne en surface est de l'ordre de 227 W/m^2 , I_{opt} devrait donc être comprise entre 11 et 57 W/m^2 .

- pour la constante de demi-vitesse d'absorption de l'azote minéral par le phytoplancton, EPPLEY et al. (1973) ont mesuré la valeur de 0,15 micromole/l pour l'absorption de NH_4 , puis 0,055 micromole/l (EPPLEY et al., 1977) dans le Pacifique Nord ; ces derniers auteurs donnent 0,24 micromole/l pour l'absorption de NO_3 ,

- enfin, pour la conversion des quantités d'azote phytoplanctonique en chlorophylle, LAWS et al. (1984) proposent un rapport pondéral N/chl. a de 18 ou 19 autour d'Hawaï, tandis que SHARP et al. (1980) ont mesuré une valeur minimale de 13 dans le tourbillon du Pacifique Nord. Mais il est notoire que ce rapport baisse chez les cellules adaptées à un faible éclairage. COSPER (1982) a mesuré 4,6 chez la diatomée Skeletonema costatum cultivée sous 16 W/m^2 .

7.2.1.4. Les résultats de l'application du modèle au site de Tahiti

Sur la figure 47 sont figurés d'une part les profils moyens de NO_3 et chl. a mesurés au large du récif durant les campagnes E.T.M. : à chaque profondeur échantillonnée on a figuré la moyenne \pm un écart-type de la moyenne, et l'on a relié ces segments par un tramage en pointillés.

```

#####
#
#          PARAMETRES BIOLOGIQUES du MODELE TAHITI
#
#
# Paramètres de la Matière détritique:
# =====
#
# 1.Taux de reminéralisation de l'Azote.Org.Détrit. à 0°C (1/jour)      .018
# 3.Taux d'augmentation des vitesses selon la température (1/degre)    .07
#
# Paramètres du Phytoplancton:
# =====
#
# 11.Taux max. de croissance brute du Phytoplancton à 0°C (1/jour)      .5
# 12.Flux lumineux optimal (W/m2)                                         30
# 13.Constante de Michaëlis pour l'Azote (microg/l)                     2.8
# 20.Taux de mortalité naturelle du Phytoplancton à 0°C(1/jour)        .1
#
#####

```

```

#####
#
#          PARAMETRES PHYSIQUES du MODELE TAHITI
#
#
# 3.Coefficient de dispersion Kz (m2/s)                                  .001
# 4.Coefficient d'extinction de la lumière (1/m)                        .032
# 5.Vitesse de sédimentation (m/j)                                       .25
#
#####

```

TABLEAU 24

D'autre part, sur cette même figure sont figurés en trait continu épais les profils de NO_3 et chl. a obtenues par résolution numérique (méthode de NEWTON) du système de 30 équations algébriques représentant le modèle à l'équilibre. Au vu du tableau 24 rassemblant les valeurs numériques retenues pour les paramètres après calibration du modèle, on remarquera que la dispersion verticale a dû être augmentée ($K_z = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$) afin de pouvoir alimenter suffisamment la surface. Associé à cette turbulence et surtout aux ondes internes, le phénomène d'adaptation du phytoplancton à des faibles éclaircissements semble important puisque le modèle nécessite une faible intensité lumineuse optimale (30 W/m^2) et un faible rapport N/chl. a (5). Des tentatives d'introduction d'une adaptation croissante à la pénombre au fur et à mesure que l'on considère des profondeurs moyennes croissantes n'ont rien apporté de satisfaisant. Le modèle reproduit le pic de chlorophylle vers 80 m mais pas la manière dont on y parvient en partant de la surface : au lieu de comporter une première phase stationnaire entre 0 et 50 m, il fournit une croissance régulière de la surface jusqu'à 60 m. Quant à la forme du profil d'azote minéral, elle est correctement reproduite mais avec des valeurs moins fortes en surface et à 300 m. Il faut remarquer également le très fort taux de mortalité adopté pour le phytoplancton : à 27° en surface, c'est plus de 60 % de la biomasse qui est consommée par jour par les zooplanctons herbivores.

La figure 48 montre les résultats du même modèle mais sans ondes internes ; dans ce modèle très simplifié, le transfert plus ou moins prolongé en profondeur des cellules par des ondes internes semble être pénalisant pour la production primaire, mais la faible différence ainsi que la rusticité du modèle ne permettent pas de conclure.

Le tableau 25 enfin donne, boîte par boîte, la sensibilité relative des valeurs d'équilibre des trois variables aux paramètres du modèle. On remarquera qu'à presque toutes les profondeurs, c'est le taux de mortalité du phytoplancton qui s'avère le paramètre le plus influent sur la biomasse phytoplanctonique, suivi du taux de croissance et du coefficient d'extinction de la lumière. Le flux lumineux optimal et le coefficient de dispersion verticale ont une influence moyenne, tandis que la vitesse de sédimentation, la constante du Michaëlis et le taux de reminéralisation influence peu sur l'état d'équilibre.

Sensibilité relative autour du point d'équilibre:

 # 1.Taux de reminéralisation de l'Azote.Org.Détrit. à 0°C (1/jour) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* 4.28%	* 3.67%	* -2.21%	* -0.86%	* .94%
Chlorophylle	* 17.18%	* 21.6%	* 14.58%	* 13.53%	* 19.34%
Azote détritique	* -8.24%	* -6.68%	* -2.56%	* -2.02%	* -3.87%

	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10*
Azote minéral	* 1.9%	* 1.87%	* 1.53%	* 1.16%	* -0.02%
Chlorophylle	* 14.81%	* 12.46%	* 11%	* 9.94%	* 4.25%
Azote détritique	* -4.94%	* -6.92%	* -9.2%	* -10.76%	* -9.59%

 # 3.Taux d'augmentation des vitesses selon la température (1/degré) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* 8.11%	* 2.86%	* -10.9%	* -13.15%	* -5.62%
Chlorophylle	* -24.33%	* -5.47%	* 4.88%	* 4.43%	* 3.59%
Azote détritique	* -11.98%	* -1.87%	* 6.85%	* 8.28%	* 8.19%

	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10*
Azote minéral	* 1.65%	* 3.2%	* 2.8%	* 2.14%	* -0.02%
Chlorophylle	* -4.04%	* -13.77%	* -23.72%	* -32.75%	* -20.54%
Azote détritique	* -0.1%	* -7.51%	* -13.7%	* -17.34%	* -13.88%

 # 11.Taux max. de croissance brute du Phytoplancton à 0°C (1/jour) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* -50.37%	* -92.31%	* -100%	* -100%	* -99.07%
Chlorophylle	* 70.13%	* 75.75%	* 38.53%	* 38.28%	* 82.72%
Azote détritique	* 56.6%	* 69.47%	* 46.06%	* 45.63%	* 74.37%

	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10*
Azote minéral	* -42.27%	* -18.3%	* -8.44%	* -4.42%	* .72%
Chlorophylle	* 82.84%	* 79.34%	* 74.53%	* 69.64%	* 29.9%
Azote détritique	* 63.89%	* 57.71%	* 52.89%	* 48.63%	* 21.05%

TABLEAU 25 ANALYSE DE SENSIBILITE

 # 12. Flux lumineux optimal (W/m2) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* -18.21%	* -32.3%	* -25.9%	* -11.23%	* 1.08%
Chlorophylle	* 44.65%	* 45.34%	* 16.14%	* 4.66%	* -5.27%
Azote détritique	* 26.98%	* 29.66%	* 14.17%	* 6.96%	* 1.87%
	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10 *
Azote minéral	* 4.05%	* 2.68%	* 1.52%	* .93%	* 0%
Chlorophylle	* -14.82%	* -19.79%	* -21.48%	* -21.59%	* -9.36%
Azote détritique	* -3.7%	* -6.04%	* -6.82%	* -6.81%	* -3.11%

 # 13. Constante de Michaëlis pour l'Azote (microg/l) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* 10.46%	* 19.57%	* 22.04%	* 21.71%	* 19.94%
Chlorophylle	* -13.72%	* -15.93%	* -9.28%	* -9.02%	* -16.4%
Azote détritique	* -11.96%	* -15.02%	* -10.25%	* -9.97%	* -15.23%
	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10 *
Azote minéral	* 7.98%	* 3.33%	* 1.5%	* .77%	* -.14%
Chlorophylle	* -14.65%	* -13.25%	* -12.11%	* -11.14%	* -4.77%
Azote détritique	* -12.36%	* -10.79%	* -9.72%	* -8.87%	* -3.82%

 # 20. Taux de mortalité naturelle du Phytoplancton à 0°C (1/jour) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* 50.33%	* 89.99%	* 94.13%	* 93.65%	* 94.66%
Chlorophylle	* -100%	* -100%	* -50.31%	* -49.28%	* -100%
Azote détritique	* -54.45%	* -63.44%	* -39.58%	* -39.98%	* -66.01%
	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10 *
Azote minéral	* 41.49%	* 18.41%	* 8.66%	* 4.6%	* -.71%
Chlorophylle	* -100%	* -100%	* -100%	* -100%	* -48.37%
Azote détritique	* -59.23%	* -55.5%	* -52.27%	* -48.95%	* -21.54%

Tableau 25 suite

*****150*
 # 1.Coefficient de dispersion Kx (m2/s) #

	* Boite 1	* Boite 2	* Boite 3	* Boite 4	* Boite 5
Azote minéral	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%
Chlorophylle	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%
Azote détritique	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%

	* Boite 6	* Boite 7	* Boite 8	* Boite 9	* Boite 10*
Azote minéral	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%
Chlorophylle	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%
Azote détritique	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%	* 0%

 # 3.Coefficient de dispersion Kz (m2/s) #

	* Boite 1	* Boite 2	* Boite 3	* Boite 4	* Boite 5
Azote minéral	* 6.05%	* -0.02%	* -4.6%	* 2.84%	* 16.86%
Chlorophylle	* 66.78%	* 70.49%	* 38.56%	* 31.98%	* 40.28%
Azote détritique	* 59.29%	* 68.34%	* 40.02%	* 31.21%	* 35.43%

	* Boite 6	* Boite 7	* Boite 8	* Boite 9	* Boite 10*
Azote minéral	* 15.58%	* 11.92%	* 8.35%	* 5.28%	* -3.07%
Chlorophylle	* 25.68%	* 17.56%	* 12.59%	* 10.62%	* -36.13%
Azote détritique	* 20.76%	* 12.72%	* 7.53%	* 3.89%	* -100%

 # 4.Coefficient d'extinction de la lumière (1/m) #

	* Boite 1	* Boite 2	* Boite 3	* Boite 4	* Boite 5
Azote minéral	* 50.37%	* 92.31%	* 100%	* 100%	* 99.07%
Chlorophylle	* -70.13%	* -75.75%	* -38.53%	* -38.28%	* -82.72%
Azote détritique	* -56.6%	* -69.47%	* -46.06%	* -45.63%	* -74.37%

	* Boite 6	* Boite 7	* Boite 8	* Boite 9	* Boite 10*
Azote minéral	* 42.27%	* 18.3%	* 8.45%	* 4.42%	* -7.72%
Chlorophylle	* -82.84%	* -79.34%	* -74.53%	* -69.64%	* -29.9%
Azote détritique	* -63.89%	* -57.71%	* -52.89%	* -48.63%	* -21.05%

 # 5.Vitesse de sédimentation (m/j) #
 #####

	* Boite 1 *	* Boite 2 *	* Boite 3 *	* Boite 4 *	* Boite 5 *
Azote minéral	* -2.19%	* -1.81%	* .06%	* .62%	* .5%
Chlorophylle	* -5.89%	* -6.55%	* -3.75%	* -2.66%	* -2.79%
Azote détritique	* -5.95%	* -6.51%	* -3.88%	* -2.96%	* -3.17%
	* Boite 6 *	* Boite 7 *	* Boite 8 *	* Boite 9 *	* Boite 10 *
Azote minéral	* .16%	* .11%	* .15%	* .2%	* .24%
Chlorophylle	* -1.42%	* -.56%	* .09%	* .53%	* 1.64%
Azote détritique	* -1.69%	* -.85%	* -.31%	* -.01%	* 1.44%

Tableau 25 fin

7.2.2. Prévision des effets écologiques du panache de rejet de la centrale E.T.M. à Tahiti

Tout d'abord, il faut préciser que les abaques existants de calcul des panaches de rejet ne sont applicables qu'à des configurations simples : il faudra donc nous restreindre à l'hypothèse du rejet sous-marin sur la face externe du récif-barrière. L'hypothèse alternative (qui aurait finalement été retenue si le projet E.T.M. s'était réalisé à Tahiti) consistera à rejeter les eaux de refroidissement dans le lagon, d'où elles s'échapperont par la suite à travers une passe, nécessiterait en effet la modélisation physique fine des courants dans le lagon, en raison des risques de piégeage d'eau froide dans certaines cuvettes et de l'inversion possible des faibles courants existant actuellement à certains endroits.

Nous avons donc retenu le cas d'un rejet par émissaire sous-marin à - 50 m débouchant sur la face externe du récif. Deux types de rejets ont été comparés :

- un rejet "mixte", où les eaux de la source froide (pompées à - 700 m) sont mélangées, après avoir déjà été partiellement réchauffées par leur passage dans le condenseur, avec des eaux de la source chaude (pompées en surface),

- un rejet "froid", où les eaux de la source froide sont rejetées telles quelles après leur léger réchauffement dans le condenseur.

Le tableau 26 donne les caractéristiques thermiques et écologiques de ces deux rejets.

7.2.2.1. Schématisation du panache par un système de boîtes successives

La première étape consiste à calculer, grâce aux abaques, l'emprise géographiques des trois phases successives du panache (cf. §7.1.) :

- le jet flottant à flottabilité négative s'établissant à partir du débouché de l'émissaire,

- l'écoulement gravitaire le long du fond en pente débutant dès que le rejet a touché le fond,

- le panache lointain de pleine eau, entraîné à l'horizontale par la dérive ambiante dès que le rejet dilué a atteint l'équilibre de densité avec la mer ambiante.

La seconde étape permet de découper ce panache en quelques boîtes contiguës pour pouvoir utiliser le formalisme du modèle écologique précédent.

7.2.2.2. Couplage du modèle biologique au modèle du panache

Les équations biologiques qui ont été couplées jusqu'ici à un modèle de tranche d'eau verticale seront cette fois couplées au modèle quasi-horizontale du panache. Contrairement au cas du calcul de la structure verticale, le système ne peut être considéré comme fermé, puisque d'une part s'y déverse au départ le rejet de la centrale et d'autre part y entre latéralement de l'eau de mer ambiante qui assure la dilution du panache. Il est donc nécessaire de préciser pour chaque boîte la composition hydrobiologique des rejets s'y faisant, qu'ils viennent de la centrale ou de la mer ambiante non-polluée. Le tableau 26 donne la description de ces rejets pour les types de panache, en utilisant comme condition aux limites les valeurs issues du profil vertical permanent calculées aux profondeurs du panache.

	Source "Centrale"		Source "Mer"			
	Rejet mélangé	froid	40-60 m	60-80 m	80-100 m	100-120 m
Azote minéral ($\mu\text{mol/l}$)	6,90	15,50	0,65	0,64	0,89	1,25
Chlorophylle ($\mu\text{g/l}$)	0,130	0	0,615	0,670	0,510	0,290
Azote détritique ($\mu\text{mol/l}$)	0,36	0	0,92	0,97	0,85	0,63
Température ($^{\circ}\text{C}$)	19,4	10,3	26,7	26,4	26,1	25,5

Tableau 26

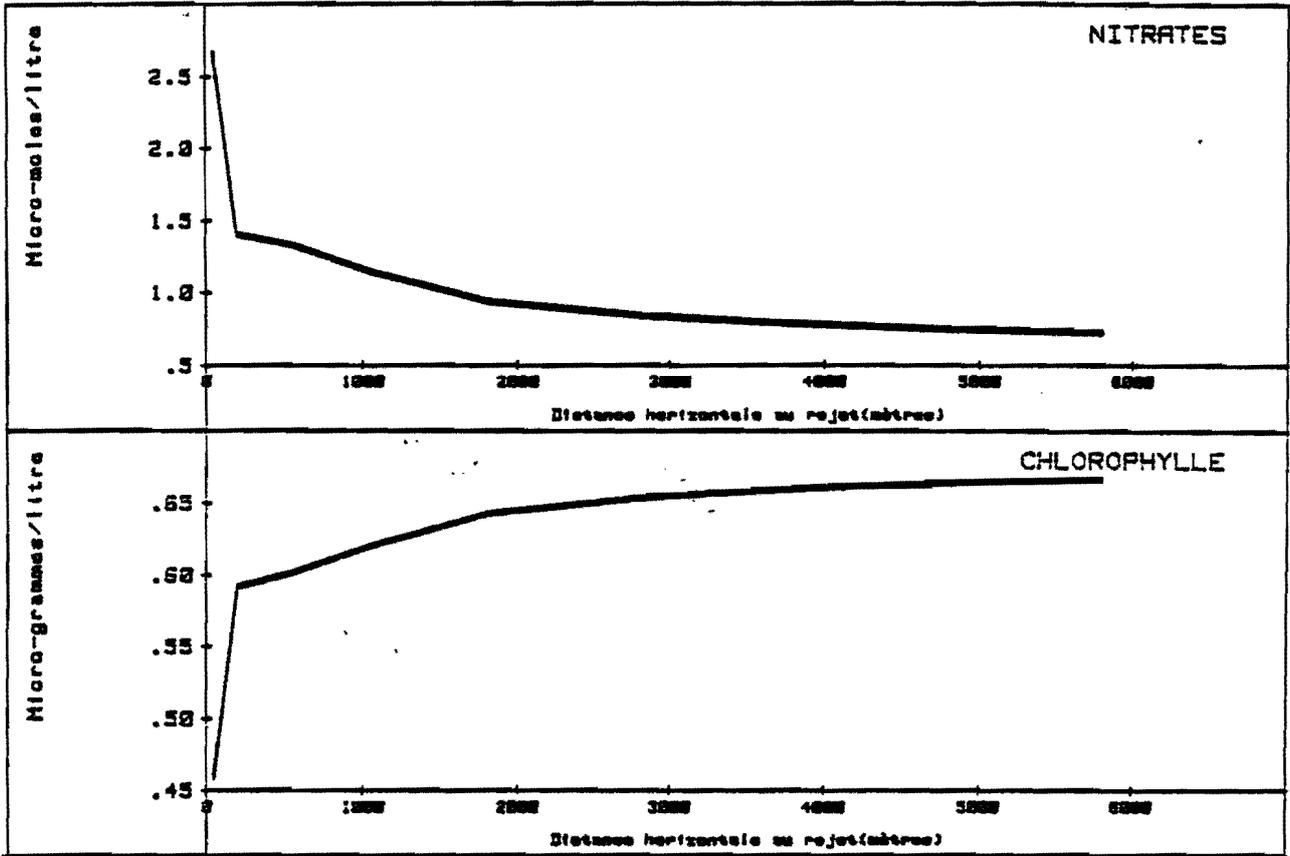


Fig.49 a et b PANACHE MELANGE

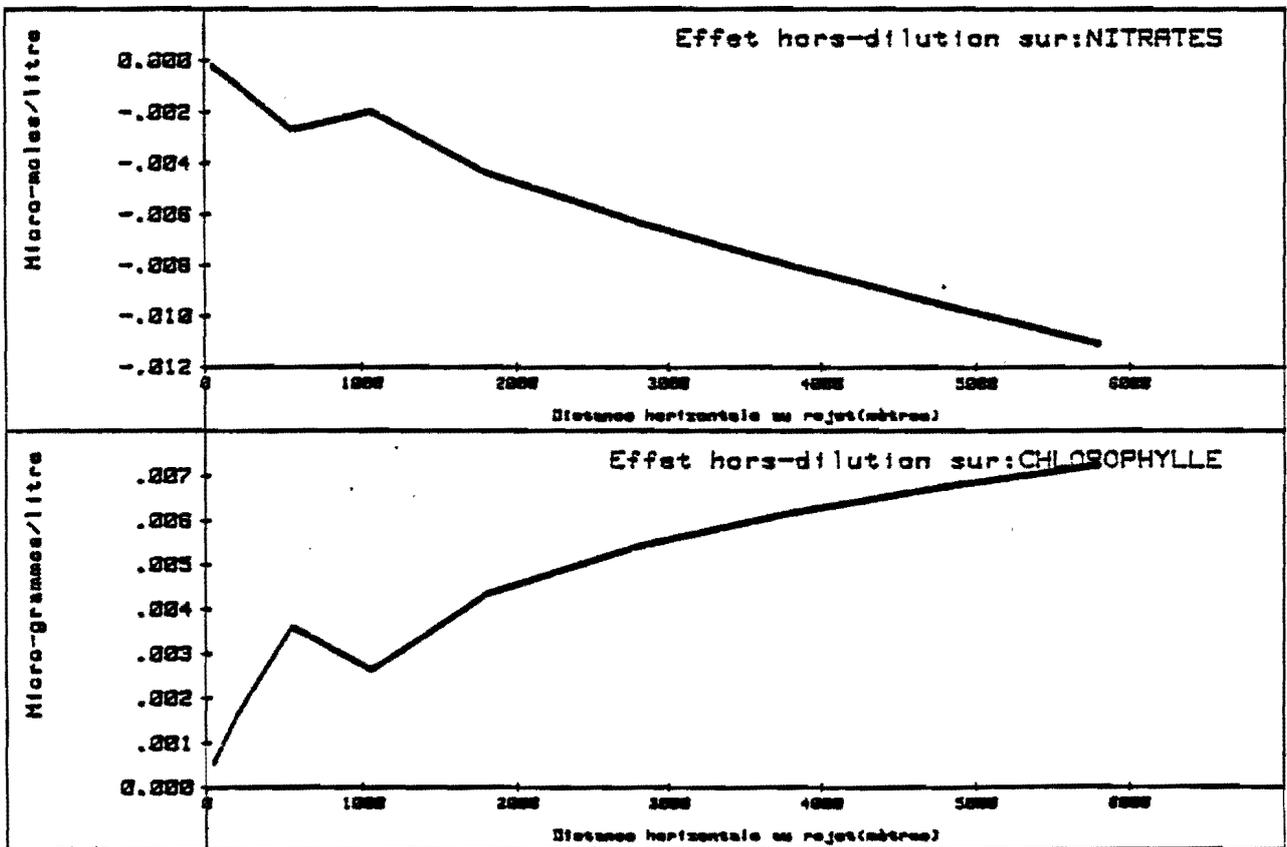


Fig.50 a et b PANACHE MELANGE

Le système d'équations différentielles caractérisant le modèle écologique du panache est similaire à celui détaillé pour le calcul de la structure verticale, aux termes rejets et prises d'eau près. Vu les flux advectifs mis en jeu, ce modèle atteint cette fois son état stationnaire en quelques heures, contrairement au modèle vertical qui nécessite plusieurs années avant de se stabiliser. De toutes manières, la résolution directe du système d'équations algébriques caractérisant l'état stable nous donne les concentrations en régime permanent. La figure 49a donne le profil longitudinal du nitrate dans le panache mélangé comparé au profil de nitrate dans l'eau ambiante autour du panache. La figure 50a donne l'évolution longitudinale de la différence entre ce profil de nitrate dans le panache et celui qui aurait résulté de la simple dilution conservative, sans évolution biologique, du rejet mélangé par l'eau ambiante. Les figures 49b et 50b font de même pour la concentration en chlorophylle dans le panache mélangé. Les figures 51 et 52 illustrent les mêmes phénomènes dans le panache froid. Les conclusions sont les suivantes :

- le panache mélangé, restant au-dessus du maximum de chlorophylle, est rapidement recolonisé par le phytoplancton ambiant,

- le panache froid, en coulant, traverse la zone du maximum de chlorophylle et entraîne donc en profondeur (vers - 110 m) une quantité non négligeable de phytoplancton qui, ensuite, va être dilué par des eaux ambiantes moins riches. Le panache froid agit donc en vecteur de phytoplancton vers le bas,

- les différences entre la simple dilution et l'évolution écologique complète sont très faibles du fait du très court temps de résidence des eaux dans le panache. Le rejet n'a donc aucun effet notable du fait de sa très rapide dilution. Qui plus est, contrairement au rejet mélangé qui stimule effectivement légèrement la production primaire, le rejet froid agit finalement négativement sur la production primaire dès qu'on se trouve à plus de 1500 m de l'émissaire : il a en effet entraîné du phytoplancton dans une zone profonde trop peu lumineuse pour qu'il puisse y subsister, encore moins y prospérer.

Donc, le rejet mélangé à - 50 m agirait effectivement comme fertilisateur extrêmement faible, alors que le rejet froid à - 50 m agirait comme un inhibiteur très léger de la production primaire.

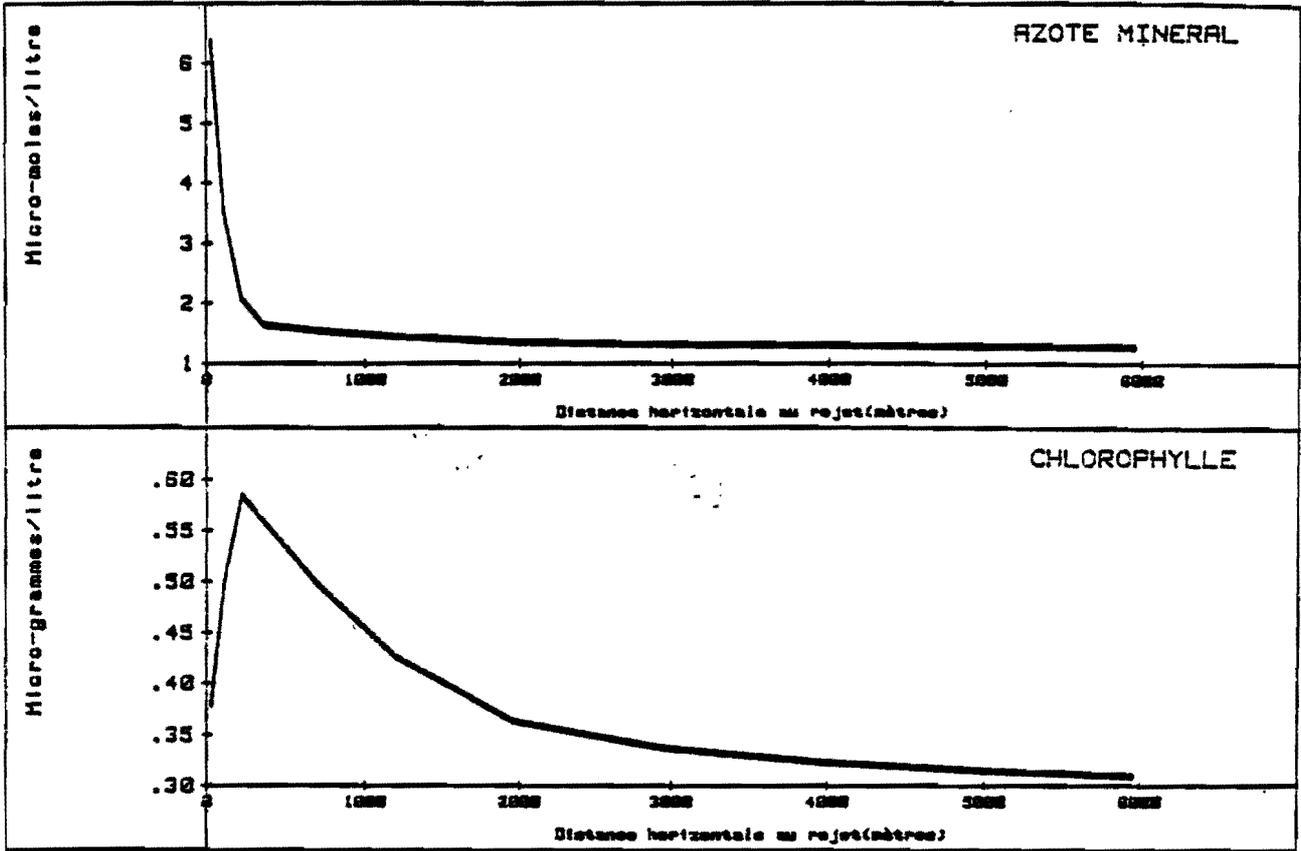


Fig. 51 a et b PANACHE FROID

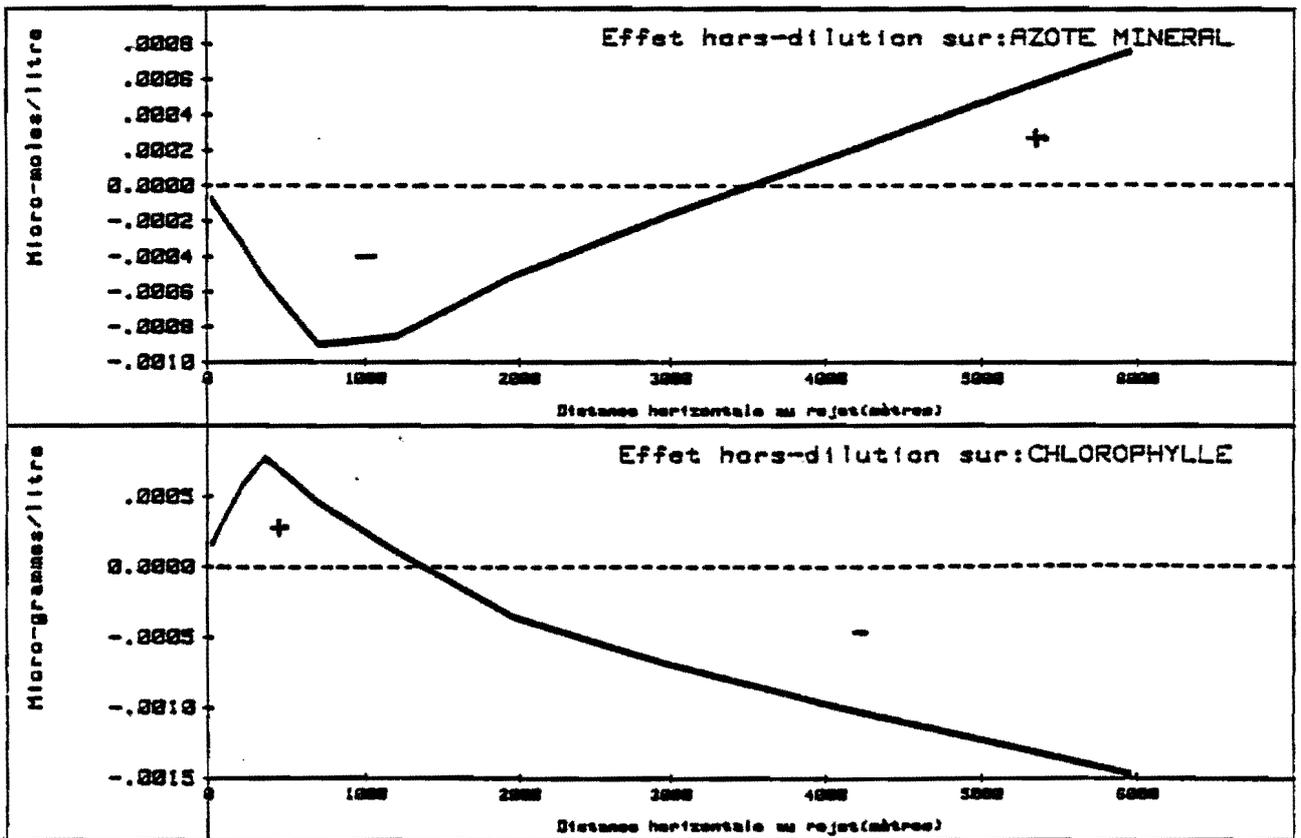


Fig 52 a et b PANACHE FROID

7.3. Effets du rejet d'eaux froides sur les coraux

La température des eaux rejetées sera d'environ 20°C si les eaux chaudes sont mélangées aux eaux froides. Cette température est nettement inférieure à la température ambiante, et il convient d'en examiner les effets potentiels sur les coraux.

JOKIEL et COLES (1977) ont réalisé une série d'expériences in vitro sur 3 espèces de coraux d'Hawaï : Pocillopora damicornis, Montipora verrucosa et Fungia scutaria. Ces expériences avaient pour but de tester l'effet de la température de l'eau sur la mortalité et la croissance des coraux d'une part et, d'autre part, sur la respiration et la photosynthèse.

7.3.1. Effet de la température sur la croissance des coraux

L'expérience menée par JOKIEL et COLES a consisté à exposer des coraux à une gamme de température variant entre 18°C et 26°C pendant 25 jours. La croissance optimale est obtenue à 26°C ; celle obtenue à 19,8°C (donc proche de celle du rejet) est significativement moindre qu'à toutes les autres températures testées. La température de 18°C est considérée comme la limite létale inférieure.

Par ailleurs, les auteurs ont noté que les coraux endommagés par une exposition à des températures élevées pouvaient récupérer après retour à des conditions de températures optimales. En contrepartie, les coraux affectés par des températures basses (18° - 19°) n'avaient pas cette possibilité de récupération.

7.3.2. Effet de la température sur la mortalité des coraux

Au cours des expériences, des effets létaux ont été observés seulement dans le bac le plus froid (18,3°C). Au cours des premiers jours, les coraux semblaient normaux, mais aux environs du huitième jour, la moitié des Pocillopora était affectée. Vers le 25^e jour, la plupart des spécimens encore en vie présentait des signes de faiblesse caractérisés. Après rétablissement de la température aux valeurs normales, la mortalité des coraux s'est poursuivie. Seuls les Fungia ont résisté au traitement.

En résumé, ces expériences montrent que le facteur température est un élément fondamental régissant la biologie des coraux. Dans le cas qui nous préoccupe, le rejet des eaux mélangées à 20°C ne devrait pas avoir de conséquences particulièrement néfastes sur les coraux, compte tenu de la surface relativement faible de la zone impactée, limitée au champ proche du rejet.

CONCLUSIONS

Ce rapport examine les effets potentiels sur le milieu marin du projet d'installation d'une centrale E.T.M. de 5 MWe à Tahiti.

Dans une première partie, les effets ont porté sur la synthèse des informations concernant l'environnement au voisinage immédiat du site sélectionné. Les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques sont abondamment développées.

Au cours de la seconde partie sont abordés les problèmes liés à la mise en évidence des impacts potentiels de la centrale sur le milieu. Un certain nombre d'effets probables ont été examinés :

- construction des ouvrages de prises d'eau et de rejet,
- effets des produits destinés à limiter le fouling,
- fuite des fluides de travail,
- entraînement des organismes dans les circuits de la centrale,
- redistribution des masses d'eaux, avec création d'un upwelling ou d'un downwelling artificiel résultant du rejet d'eaux froides profondes riches en éléments nutritifs dans les eaux de surface chaudes et pauvres en sels minéraux.

Compte tenu du dimensionnement relativement réduit de la centrale projetée, ce qui implique en particulier des volumes d'eau assez faibles, ainsi que des travaux de génie civil de peu d'envergure, les différents cas analysés montrent que les effets potentiels de la centrale (cas d'un rejet côté océan) restent dans la plupart des cas minimes. Le rejet côté lagon n'a pas été étudié finement du fait du manque d'information concernant la circulation lagonaire (cf. §7.2.2.).

Parmi les impacts affectant plus spécifiquement la biologie du site on peut retenir que :

- la biomasse phytoplanctonique susceptible d'être entraînée quotidiennement dans la prise d'eau de surface est évaluée à $311 \text{ g.chlo a.j}^{-1}$ soit 26 kg.C.j^{-1} ,

- la biomasse zooplanctonique entraînée par la prise d'eau chaude sera de l'ordre de 6 kg.C.j^{-1} , et celle entraînée par la prise d'eau froide voisine de 170 g.C.j^{-1} ,

- la mise au point d'un modèle mathématique a permis de préciser l'effet de la centrale sur le phytoplancton. Ce modèle confirme que, du fait du faible temps de résidence des eaux dans le panache, le rejet n'a qu'un effet limité,

On constate par ailleurs que dans le cas d'un rejet mélangé (eau froide + eau chaude), il se produit une très légère stimulation de la production primaire, alors que dans le cas d'un rejet des eaux froides seules, on observe un effet négatif sur la production primaire dès qu'on se trouve à plus de 1500 m de l'émissaire.

En conclusion, les risques potentiels associés aux centrales E.T.M. de taille réduite (5 MW) ne semblent pas devoir altérer gravement la flore et la faune marine vivant à proximité. Toutefois, il n'existe pas encore de centrale actuellement en fonctionnement, sur laquelle baser un diagnostic plus précis que celui établi dans le présent rapport. Certaines incertitudes demeureront donc en suspens (par exemple : effet d'un rejet dans le lagon), tant qu'un prototype n'aura pas été construit et surveillé quant à ses effets réels sur l'environnement marin.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLENDER J.H., DITMARS J.D., PADDOCK R.A. et K.D. SAUNDERS, 1978. OTEC physical and climatic environmental impacts : an overview of modeling efforts and needs. In Proc. 5th OTEC Conference : pp. III.165, III.185. US D.O.E. Wash. DC.
- BEAN R.A. et J.H. CARPENTER, 1981. Aquatic chemical constituents : Interactions with chlorination. Water chlorination Symposium. Asilomar. California : pp. 18-23, Oct. 1981. Ann. Harbor. Sciences Pub.
- BIENFANG P.K. et K. GUNDERSEN, 1977. Light effects on nutrient limited, oceanic primary production. Mar. biol. 43 : pp. 187-199.
- BIENFANG P.K. et J.P. SZYPER, 1984. Temporal variability of phytoplankton in a subtropical ecosystem. Limn. Oceanogr. 29(3) : pp. 527-539.
- BROCK V.E., JONES R.S. et P. HELFRICH, 1966. An ecological reconnaissance of Jonhston Island and the effects of dredging. 2nd Annual Rept. N° 11. Hawai Marine Lab. Honolulu, Hawai.
- CAIRNS J.Jr, 1968. Suspended solids standards for the protection of aquatic organisms. 22nd Purdue Indust. Waste Conf. Purdue University Eng. Bull. 129 : pp. 16-27.
- CARPENTER E.J., PECK B.B. et J.J. ANDERSON, 1974. Survival of copepods passing through a nuclear power station on northeastern Long Island. Soun. U.S.A. Mar. Biol. 24 : pp. 49-55.
- CAVANIE A., 1983. Vague et rafale de projet (hors cyclones) pour le site du port de Papeete. In Séminaire ETM Site. Brest 27-28-29 sept. 1983 : pp. 150-158, Vol. 1.
- CETE, 1986. Etude de deux sites de rejet en mer des eaux urbaines usées entre la passe de Taapuna et la pointe Venus. Ministère de l'Équipement de Polynésie française. Service de l'Aménagement : 165 p.
- CHARPY L. et J. TEURI, 1985. Evolution des pigments phytoplanctoniques à la station côtière de la digue Nord-Est de Papeete en 1983 et 1984. Centre ORSTOM de Tahiti. Archives d'Océanographie 85/12.
- COCHONAT P., 1986. Recueil et synthèse des données géotechniques de la reconnaissance du site ETM. DERO/IFREMER : 21 p. + annexes + cartes.
- CULLEN J.J., 1982. The deep chlorophyll maximum : comparing vertical profiles of chlorophyll a. Can. J. Fish. Aquat. Sci. 39 : pp. 791-803.
- DAMY G., 1983. E.T.M. Etude de site de Tahiti. Importance du phénomène d'ondes internes. Séminaire E.T.M. Site - Brest, 27-28-29 sept. 83, Vol. 2 + Annexes.
- DAVIS H.C., 1960. Effects of turbidity producing materials in the sea water on eggs and larvae of the clam Venus (mercenaria) mercenaria. Biol. Bull. 118 : pp. 48.54.

- DAVIS H.C. et H. HIDU, 1969. Effects of turbidity producing substances in sea water on eggs and larvae of three genera of bivalves mollusks. The Veliger. 11(4) : pp. 316-323.
- DEFANT A., 1950. Reality and illusion in oceanographic survey. J. Mar. Res. 9(2) : pp. 120-138.
- de NARDI J.L., RAYMOND A. et M. RICARD, 1983. Etude des conséquences pour le lagon de Taunoa des travaux d'extension du port de Papeete. Etude descriptive du site actuel. Rapport CEA R. 5222.CEN. de Fontenay.
- DEXTER A., 1979. Localized corrosion of aluminium alloys for OTEC heat exchanges. Rept. NTIS. ANL/OTEC-BCM.009.
- DITMARS J.D., 1979. Assessment and control of OTEC physical environmental impacts. In Proc. environmental control symposium : pp. 142-151. Report DOE/EV 0046. Vol. 3 US DOE. Washington D.C.
- DITMARS J.D. et R.A. PADDOCK, 1979. OTEC physical and climatic environmental impacts. In Proc. 6th OTEC conference : pp. 13.11.1 to 13.11.8. US DOE. Washington D.C.
- EPPLEY R.W., 1972. Temperature and phytoplankton growth in the sea. Fisheries bull. 70 : pp. 1063-1985.
- EPPLEY R.W. et al., 1967. Sinking rates of marine phytoplankton measured with a fluorometer. J. Exp. mar. Biol. Ecol. 1 : pp. 191-208.
- EPPLEY R.W. et al., 1973. A study of plankton dynamics and nutrient cycling in the central gyre of the North Pacific Ocean. Limnol. Oceanogr. 18 : pp. 534-551.
- EPPLEY R.W. et al., 1977. Particulate organic matter in surface waters off southern California and its relation to phytoplankton. J. Mar. Res. 35 : pp. 671-696.
- EPPLEY R.W., RENGER E.H., VENRICK E.L. et M.M. MULIN, 1973. A study of plankton dynamics and nutrients in the central gyre of the North Pacific Ocean. Limn. Oceanogr. 18 (4) : pp. 534-551.
- EPPLEY R.W., RENGER E.H. et W.G. HARRISON, 1979. Nitrate and phytoplankton production in Southern California coastal waters. Limn. Oceanogr. 24 (2) : pp. 483-494.
- FLEMER D.A., DOVEL W.L., PFITZENMEYER H.T. et al., 1968. Biological effects of spoil disposal in Chesapeake Bay. J. Sanit. Engeneering Dis. Proc. Am. Soc. civ. Eng. 94 : pp. 683-706.
- FRAIZIER A., 1980. Etude des conséquences de travaux de dragage du chenal de Taunoa. Note CEA. N.2618 : 30 p.
- GRANDPERRIN R. et A. MICHEL, 1969. Evaluation des poids humides de micro-necton après centrifugation. Mar. biol. 4 : pp. 139-142.
- GUNDERSEN K.R. et al., 1976. Structure and biological dynamics of the oligotrophic ocean photic zone off the Hawaiian Islands. Pac. Sci. 30 : pp. 45-68.

- HELLAND-HANSEN B. et F. NANSEN, 1909. The Norwegian Sea. Norw. Fish. and Mar. Invest. 2 n° 1 and 2.
- HELZ G.R. et R.Y. USU, 1978. Volatile chloro and bromocarbons in coastal waters. Limn. Oceanogr. 23 (5) : pp. 858-869.
- HELZ G.R., SIGLED A.C. et C.A. HILL, 1980. Mechanismes of chlorine degradation in estuarine waters : In "Water chlorination" vol. 3 Ann. Harbr. Science. Pub. Inc. : pp. 387-394.
- HERBLAND A. et B. VOITURIEZ, 1979. Hydrological structure analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic ocean. J. Mar. Res. 37 : pp. 87-101.
- HIROTA J., 1977. DOMES zooplankton. Final report. Hawaiï inst. Mar. Biol. and Depart. Oceanogr. Univ. Hawaiï, Honolulu : 247 p.
- INGLE R.M., 1952. Studies on the effects of dredging operation upon fish and shellfish. Tech. serv. n° 5, State of Florida Board of Conservation. Tallahassee. Fl.
- JOHANNES R.E., 1975. Pollution and degradation of coral reef communities in tropical marine pollution. Fergusson E.J. and JOHANNES R.E. edit. Elsevier Oceanography Series : pp. 13-51.
- JONHSON D.S., 1970. The galatheidae of Singapore and adjacent waters. Bull. Nat. Mus. Singapour 35 : 1-44.
- KAMYKOWSKY D., 1974. Possible interactions between phytoplankton and semi-diurnal internal tides. J. Mar. Res. 32 (1) pp. 1084-1102.
- KESSLER M. et Y. MONBET, 1984. Projet ETM. Résultats des études du site. Vol. 1. SDT/COB/IFREMER : 499 p.
- KESSLER M. et Y. MONBET, 1985. Avant-projet Tahiti - Centrale ETM 5 MW. Résultats des études de site. Volume 1 ter. DIT/COB/IFREMER : 338 p.
- KESSLER M. et Y. MONBET, 1987. Avant-projet Tahiti - Centrale ETM 5 MW. Résultats des études de site. Volume 1 ter. DIT/COB/IFREMER : 168 p.
- KEMP H.A., 1949. Soil pollution in the Potomac River Basin. J. Amer. Water Works Ass. 16 : pp. 163-181.
- KING F.D., 1986. The dependence of primary production in the mixed layer of the eastern tropical Pacific on the vertical transport of nitrate. Deep. Sea Res. 33 (6) : pp. 733-754.
- KOSTYUCHENKO G.P., 1973. Effects of elastic waves generated in marine science prospecting on fish eggs in the black sea. Hydrobiol. J. 9 (5) : pp. 45-48.
- LAWS E.A. et al., 1984. High phytoplankton growth and production rates in oligotrophic Hawaiian coastal waters. Limnol. Oceanogr. 29 : pp. 1161-1169.
- LOOSANOFF W.L. et F.D. TOMMERS, 1938. Effect of suspended silt and other substances on rate of feeding of oyster. Science 107 : pp. 69-70.

- LUNZ G.R.Jr., 1938. Part 1. Oyster culture with reference to dredging operations in South Carolina. Part. II. The effects of flooding in the Santee River in April 1936 on oyster in the Cape Romain area of South Carolina. Rept. to US. Army Engineering district - Charleston S.C.
- MACALADY, D.L., CARPENTER J.H. et MOORE C.A., 1977. Sunlight induced bromate formation in chlorinated seawater. Science 195 : pp.1335-1337.
- MACKIN J.G., 1956. Studies on the effect of suspensions of mud in sea water on oysters. Rept. n° 19. Texas A & M Research Foundation project 23. College station Tex.
- MARSU J.A. et G.D. GORDON, 1974. Marine environmental effects of dredging and power plant construction. Univ. Guam. Mar. Lab. Tech. Rept. 8 : 56 p.
- MARCHAND Ph., 1985. L'énergie thermique des mers. Publ. IFREMER : 211 p.
- MAYNARD S.D., RIGGS F.V. et J.F. WALKERS, 1975. Mesopelagic micronekton in Hawaiian waters : Faunal composition, standing stock and diel vertical migrations. Fish bull. 74 : pp. 726-736.
- MORGAN R.P., RASIN V.J. et L.A. NOE, 1973. Effects of suspended sediments on the development of eggs and larvae of striped bass and white perch. Ref. n° 73-110. Univ. Maryland. Nat. Res. Inst. College Park Maryland.
- MYERS E.P. et J.D. DITMARS, 1985. Ocean thermal energy conversion : Environmental effects. In wastes in the ocean. Vol. 4. Energy wastes in the ocean. DUEDELL I., KERTER D., PARK P.K. and KETCHUM B. edits. Wiley interscience : pp. 164-192.
- PADDOCK R.A. et J.D. DITMARS, 1983. Initial screening of licence application for OTEC plants with regard to their interactions with the environment. ANL/OTEC/EV/Argonne. National Lab. Univ. Chigago. US Depart of Energy.
- PEDDICORD et al., 1975. Dredged disposal study. San Francisco Bay and estuary. Appendice G. US Army Engineer District. San Francisco. Cal.
- PORCHER M., 1986. (cf. CETE, 1986).
- RENON J.P., 1978. Un cycle annuel du zooplancton dans un lagon de Tahiti. Cah. ORSTOM, Serv. Oceanogr. 16 (1) : pp. 63-88.
- RICARD M. et al., 1981. Etude des organismes vivants, plancton et benthos du secteur lagunaire et récifal de Taunoa. Etude descriptive du site actuel. Rapport MNHN/EPHE.RA 5/1981 : 46 p.
- RICARD M. et B. DELESALLE, 1982. Approche d'un effet de masse insulaire en Polynésie française : Phytoplancton des eaux côtières de Tahiti. Oceanis, vol. 8, fasc. 4 : pp. 309-318.
- RICARD M., 1986. Projet ETM - Résultats des études de site. Biologie : Phytoplancton - zooplancton - biosalissures - rapport de fin d'études. Contrat CNEXO 83/7312. Naturalia et Biologia. Museum d'Histoire Naturelle.

- RITCHIE D.W., 1970. In Gross physical and biological effects of overboard spoil disposal in upper Chesapeake bay. Nat. Res. Inst. Spec. Rept. n° 3. UNiv. Md.
- ROBERT S., 1983. Projet ETM. Le sol. Présentation et analyse des résultats déjà obtenus. Séminaire ETM. Site. Brest 27-28-29 septembre 1983 : pp. 164-178.
- ROUGERIE F., VIENNEY P.J. et L. MAREC, 1985. Les eaux côtières Nord de Tahiti et leur contexte hydroclimatique. ORSTOM.ISSN 0755-3412. Oceanographie Notes et Documents.
- SALVAT et al., 1979. Conséquences écologiques des activités d'une zone d'extraction de sable corallien dans le lagon de Moorea (iles de la Société - Polynésie française). Cah. Indo. Pacifique 1 (1) : pp. 83-126.
- SARABUN C.C., BRANDT A., TYLER M. et SMITH G., 1985. Biological transport, internal waves and mixing in the Chesapeake bay. John Hopkins APL Technical n° 30 C.B.I. John Hopkins University Baltimore Md.
- SCHUBEL J.R. et J.L.S. WANG, 1973. The effect of suspended sediments on the hatching success of *Perca flavescens*, *Morone americana*, *Morone saxatilis* and *Alosa pseudoharengus* eggs. Spec. Rapt. n° 30 C.B.I. John Hopkins, University Baltimore Md.
- SHERK J.A., O'CONNER J.M. et D.A. NEWMANN, 1976. Effects of suspended solids on selected estuarine plankton. Misc. Rept. 76.1 US Army Coastal Engineering Res. Center. Fort Belvoir. Va.
- SHOPP R., 1983. Etude de la houle à Papeete. Rapport de stage de DEA Oceanographie physique. Univ. Bretagne Occidentale : 54 p.
- SMETACEK ., 1985. Role of sinking in diatom life history cycles : ecological, evolutionary and geological significance. Mar. Biol. 84 : pp. 239-251.
- STONE R.L., PALMER R. et CHEN W.T., 1974. A study of the effects of suspended particulate matter on some marine bottom dwelling invertebrates. Northeastern Univ. Mar. Sci. Cent. Final Rept. DACW. 33-74-C-0101. US Army Engineer Division. New-England, CE. Boston. Mass.
- SULLIVAN S.P. and F. GERRITSEN, 1973. Dredging operation monitoring and environmental study, Kawaihae Harbor, Hawaiï. Look ocean Eng. Lab. Techn. Rept. 25 : 171 p.
- SVERDLOFF S.N., 1973. The status of marine conservation in American SAMOA. In Regional Symposium on Conservation of Nature. Reefs and lagoons South Pacific Commission : pp. 23-28.
- SWARP J.H. et al., 1980. Phytoplankton rate processes in the oligotrophic waters of the central North Pacific Ocean. J. Plank. Res. 2(4) : pp. 335-353.
- UCHIDA R.N., 1983. Summary of pertinent biological characteristics of potential ocean thermal energy conversion (OTEC) sites in the Pacific Ocean. Admin. Rept. H.83.13. Southwest fish. Cah. Honolulu Lab. WOMA : 91 p.

- U.S. Department of Energy, 1979. Environmental assessment, ocean thermal energy conversion (OTEC) program. Preoperational ocean test platform. US DOE. DOE/EA 0062 : 381 p.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1976. Quality criteria for water. US EPA. Washington D.C., 20460 : 256 p.
- VENRILK E.L., Mac GOWAN J.A. et A.W. MANTYLA, 1973. Deep maxima of photosynthetic chlorophyll in the Pacific ocean. Fish. Bull. 71 (1) : pp. 41-52.
- VINE P.J., 1972. Coral reefs conservation around the Seychelles. Indian Ocean. Biol. Conservation 4 : pp. 304-305.
- WILSON W., 1950. The effects of sedimentation due to dredging operations on oysters in Copano Bay, Texas. M.S. Thesis. Texas A & M. College Station, Tex.
- WUNSH, 1975. Deep ocean internal waves : What do we really know ? J. Geoph. Res. 80 (3) : pp. 333-343.
- WYCHERLEY P.R., 1969. Conservation of coral reefs in West Malaysia. Biol. Conserv. 1 : pp. 259-260.
- YELVERTON J.T., 1975. The relationship between fish size and their response to underwater blast. Defense Nuclear Agency. Depart. Defense. Washington D.C. Rept. DNA 3677 T.42.

A N N E X E

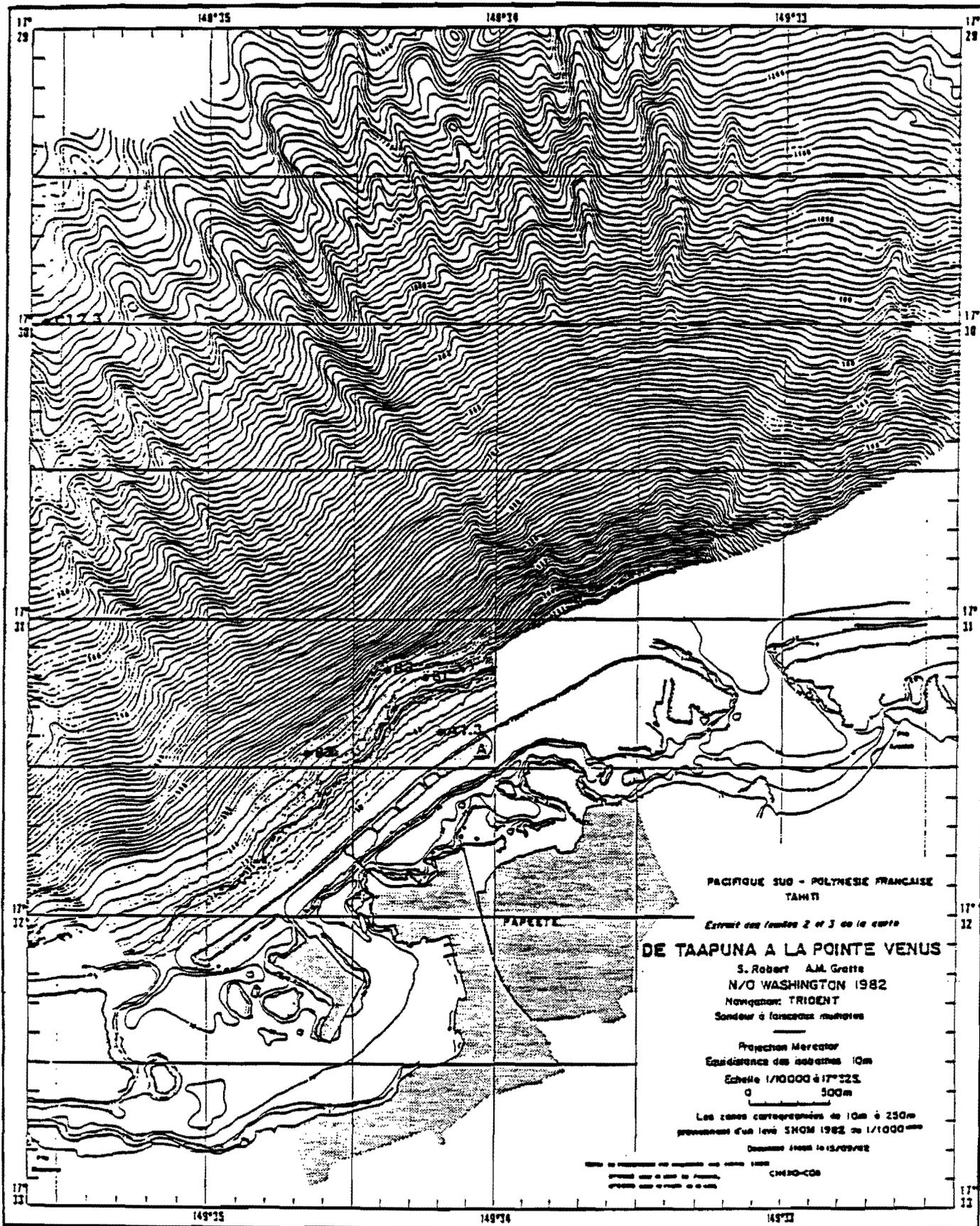
Localisation des lignes de mouillage des courantomètres

Périodes de mesures

Schémas des lignes

177

CAMPAGNE ETM LOCALISATION DES MOUILLAGES



MOUILLAGES E.T.M.

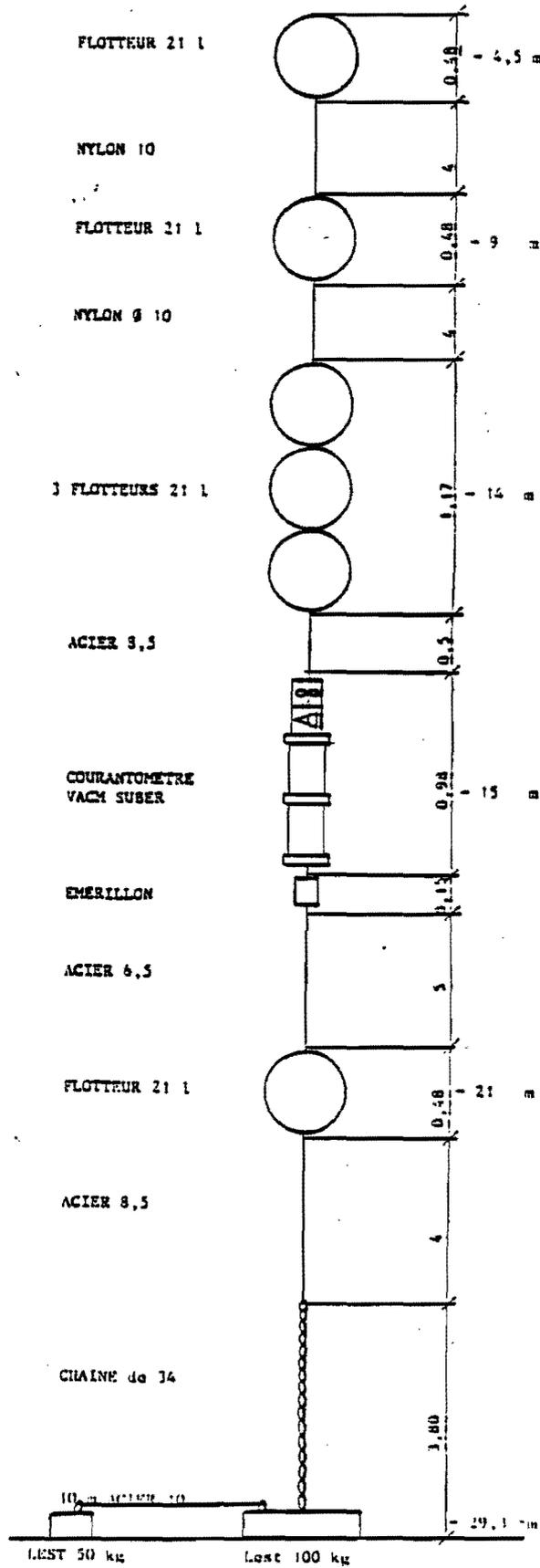
1^{re} campagne

				1982		1983		
				Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
CYCLONES				LISA		ORAMATREVA		
POINT A ₁	17° 31', 38 S	LIGNE 1 -	- 15 m	22	C 124			7
	149° 34', 19 W			(p.t.D.V.)				
POINT B ₁	17° 31', 19 S	LIGNE 4 -	- 100 m	23	C 132	13	Coulé fond 390 m à LISA	15
	149° 34', 25 W		(p.t.D.V.)		(p.t.)			
		- 300 m	23	C 131			15	
			(p.t.D.V.)					
POINT C ₁	17° 29', 97 S	LIGNE 5 -	- 300 m	23	C 135			14
	149° 35', 53 W		(p.t.D.V.)					
		- 600 m	23	C 136	Défaut mémoire sur courants		14	
		- 900 m	(p.t.)					
		- 950 à 1050 m	23	C 133			14	
				(p.t.D.V.)				
				23	T 238			14
				(p.t tous les 10 m)				

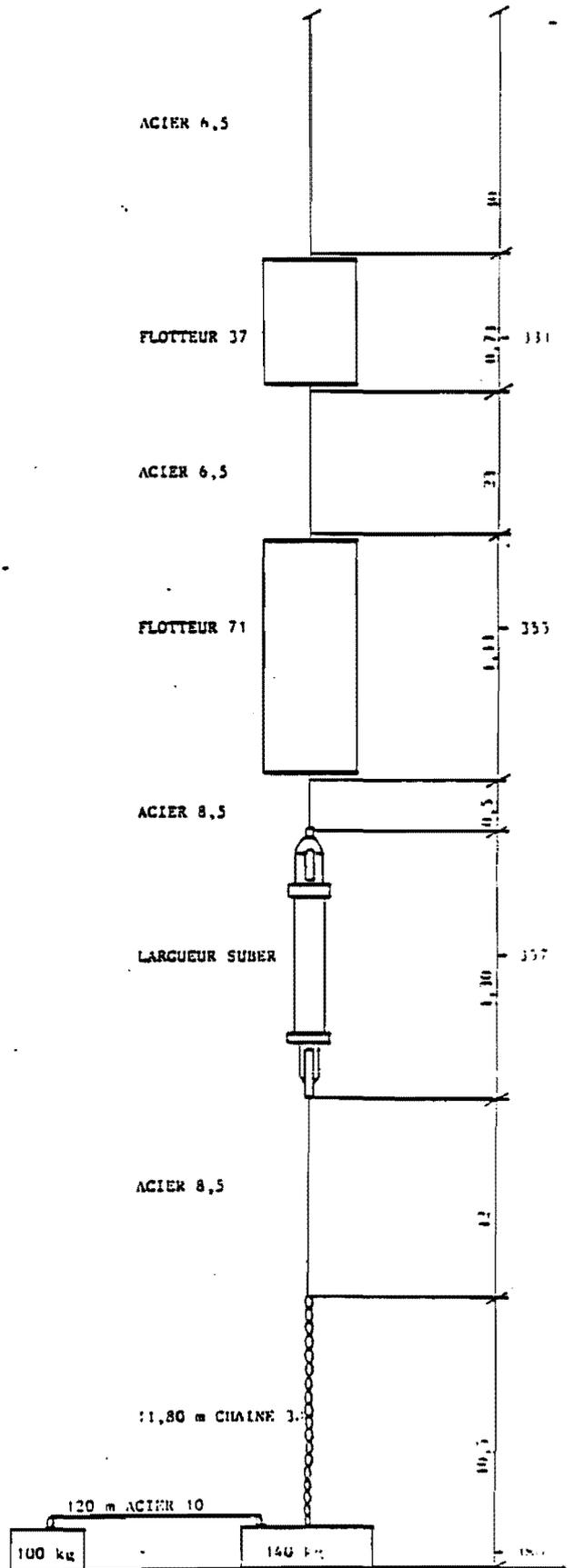
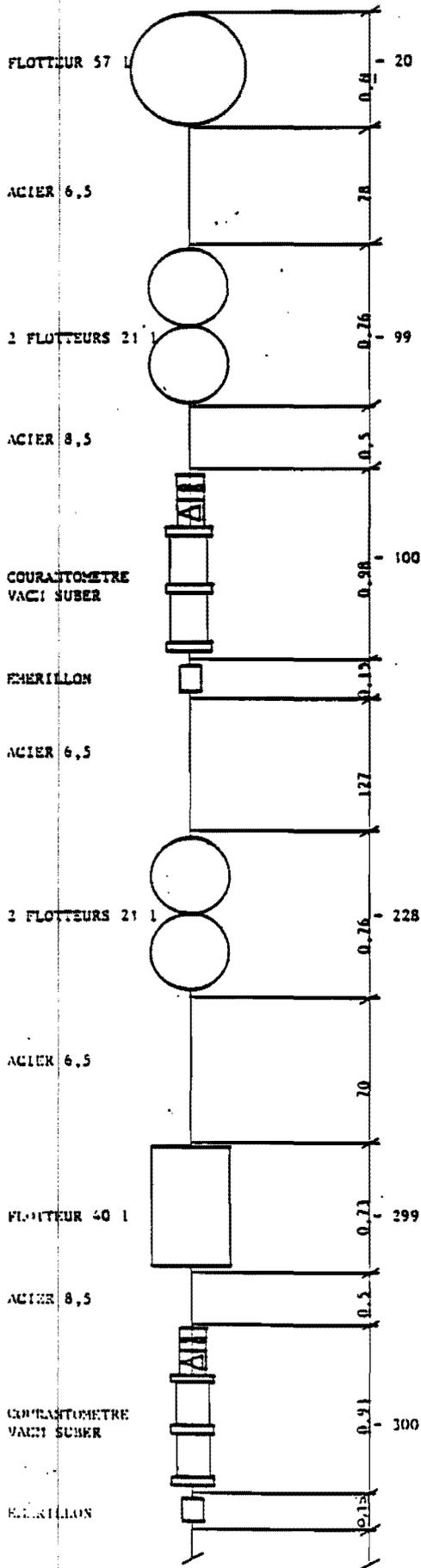
Légendes

- C : Courantographe VACM SUBER
 T : Chaîne Aanderaa de 100 m, 1 thermistance tous les 10 m
 p : Profondeur en dBars
 t : Température en degrés C
 D : Direction du courant en degrés
 V : Vitesse de courant en cm/s

SCHEMA LIGNE 1



SCHEMA LIGNE 4



MOUILLAGES E.T.M.

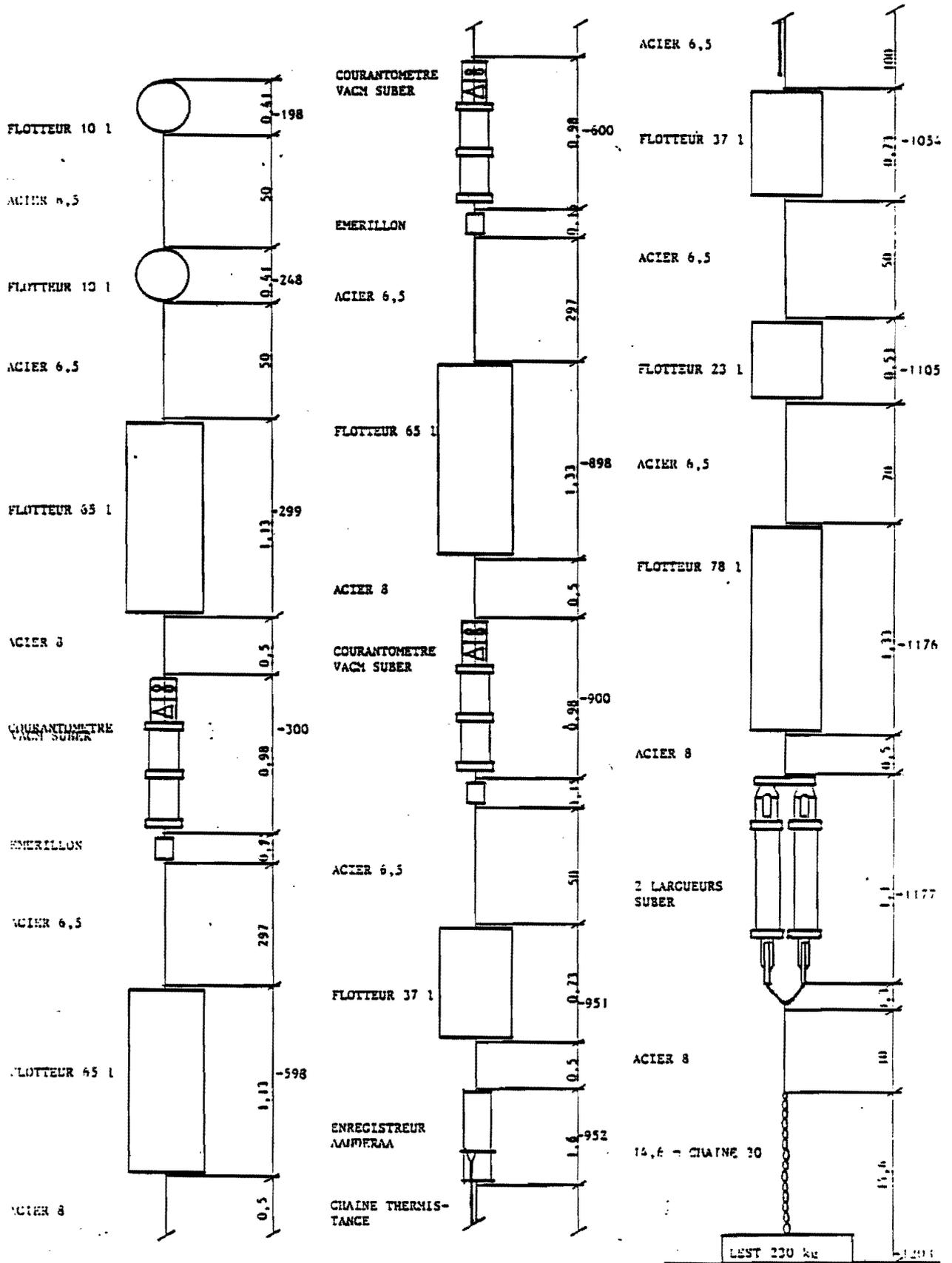
2^e campagne

				1983				
				Mars	Avril	Mai	Juin	
CYCLONES				REVA		VEENA		
POINT B ₂	17° 31', 44 S 149° 34', 68 W	LIGNE 7 -	- 15 m	26	C 163	saturé à VEENA	22	
						(p.t.D.V.)		
			- 19 à 119 m		T247		(t tous les 10 m)	
			- 122 m		C132		(p.t.D.V.)	
		- 322 m		C131	Rouet cassé			
						(p.t.)		
POINT C ₂	17° 29', 74 S 149° 35', 74 W	LIGNE 5 -	- 300 m	23	C 135		21	
						(p.t.D.V.)		
			- 600 m		T162		(p.t.D.V.)	
			- 900 m		C133	Défaut mémoire sur courants		
		- 950 à 1050 m		T238		(p.t.)		
						(p.t. tous les 10 m)		

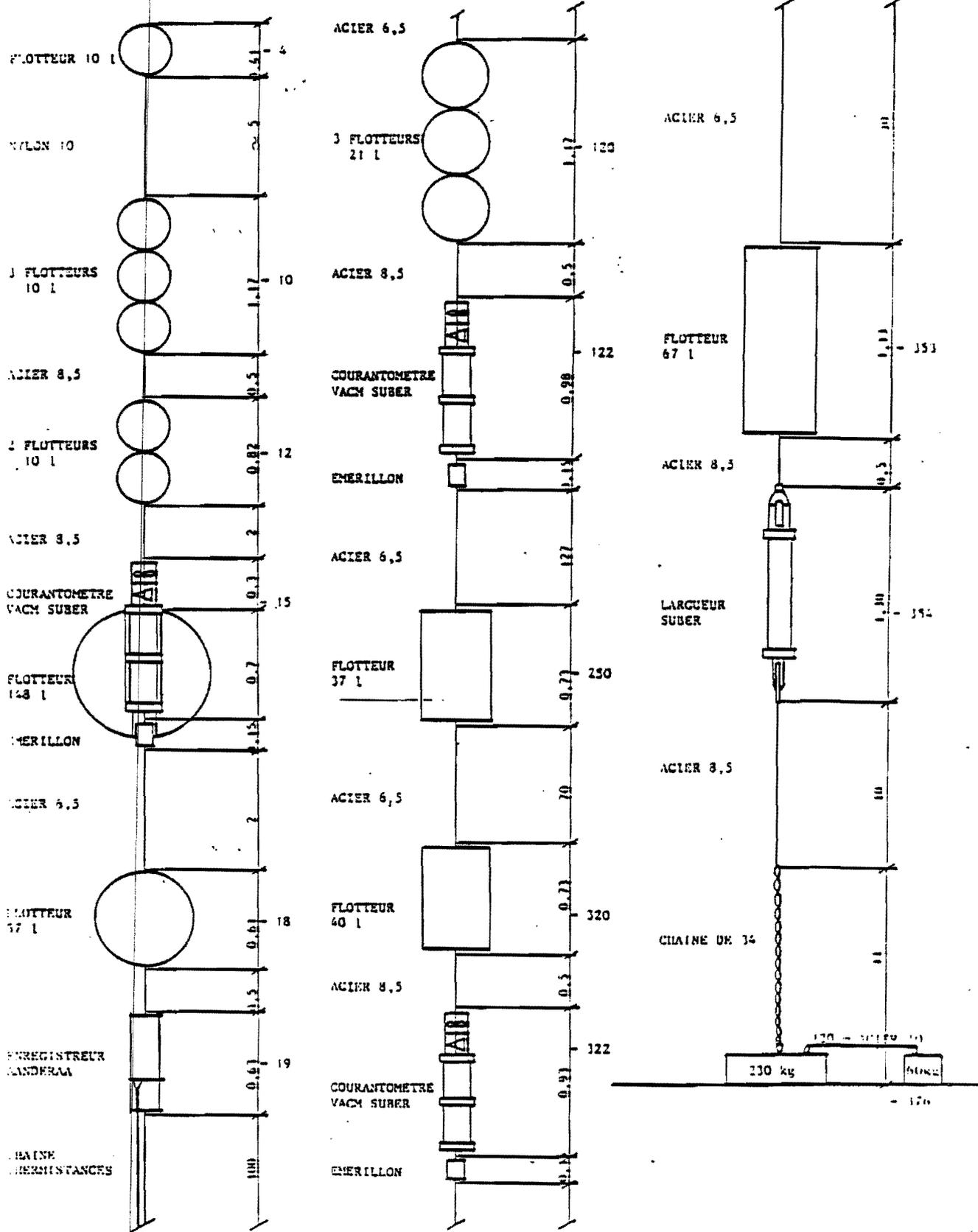
Légendes

- C : Courantographe VACM SUBER
 T : Chaîne Aanderaa de 100 m, 1 thermistance tous les 10 m
 p : Profondeur en dBars
 t : Température en degrés C
 D : Direction du courant en degrés
 V : Vitesse de courant en cm/s

SCHEMA LIGNE 5



SCHEMA LIGNE 7



MOUILLAGES E.T.M.

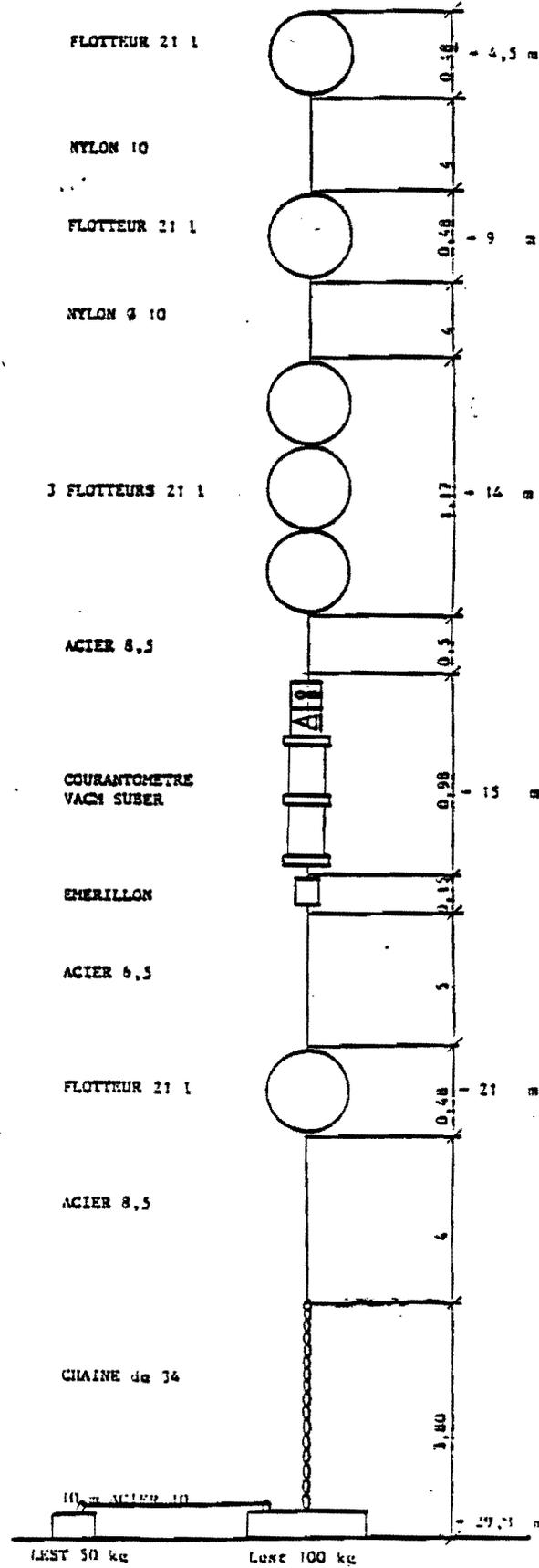
3^e campagne

				1983				
				Juillet	Août	Septembre	Octobre	
POINT A ₃	17° 31', 36 S	LIGNE 1 -	- 15 m	11 C 133	28		24	
	149° 34', 16 W			<hr/>				
POINT B ₃	17° 31', 17 S	LIGNE 7 -	- 15 m	11 C 190 26	Ligne draguée ? cassée		24	
	149° 34', 38 W			(p.t.D.V.)	<hr/>			
			- 19 à 119 m	T 262	<hr/>			
			- 122 m	C 132	<hr/>			
			- 322 m	11 C 131			ligne relevée	
			(p.t.D.V.)	(p.t.)	<hr/>			
POINT C ₃	17° 29', 74 S	LIGNE 5 -	- 300 m	6 C 135			24	
	149° 35', 74 W				(p.t.D.V.)		<hr/>	
			- 600 m	V 162	<hr/>			
			- 900 m	C 136			4 arrêt ?	
			- 950 à 1050 m	T 238			(p.t. tous les 10 m)	
				(p.t.D.V.)		<hr/>		

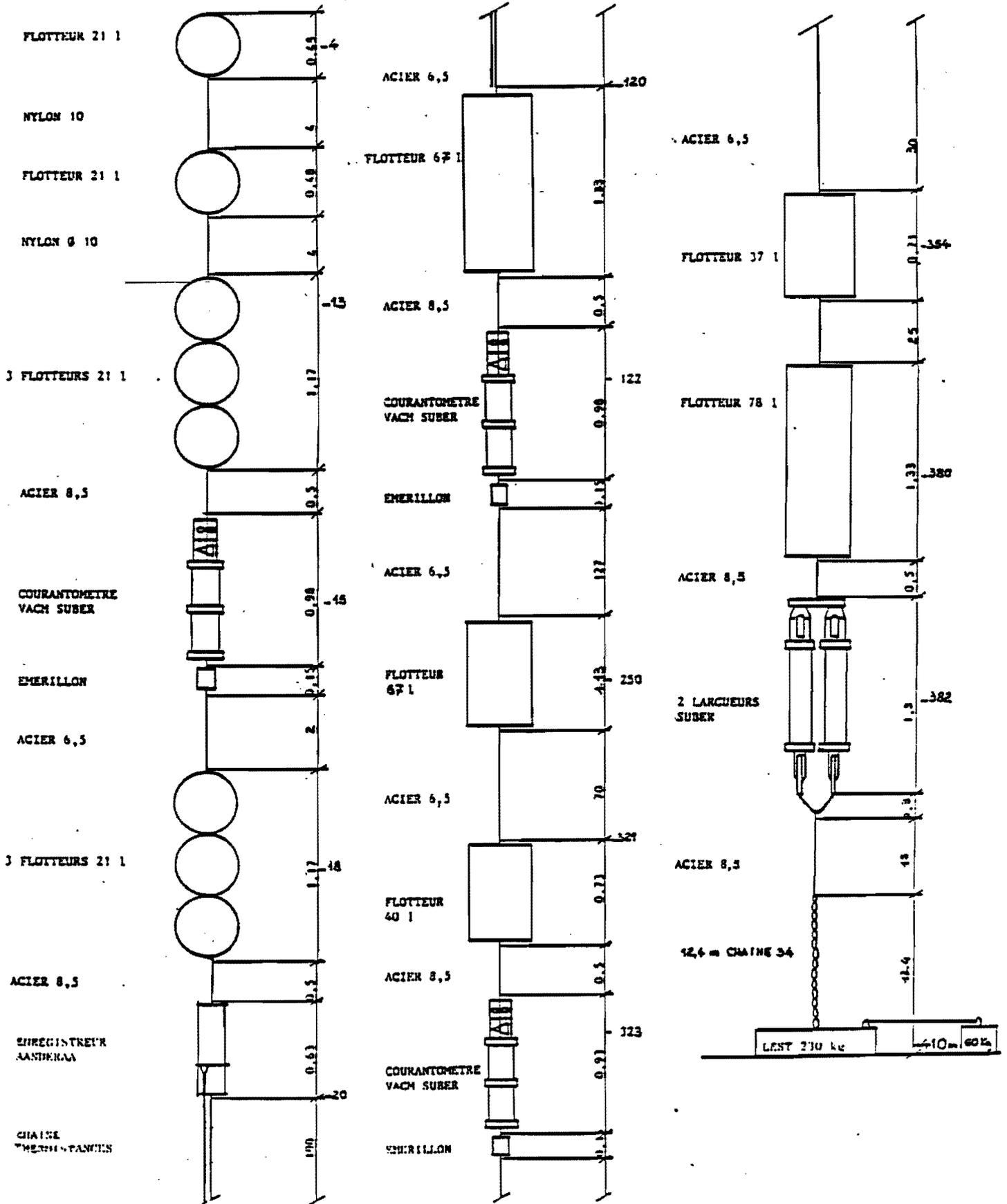
Légendes

- C : Courantographe VACM SUBER
 T : Chaîne Aanderaa de 100 m, 1 thermistance tous les 10 m
 p : Profondeur en dBars
 t : Température en degrés C
 D : Direction du courant en degrés
 V : Vitesse de courant en cm/s

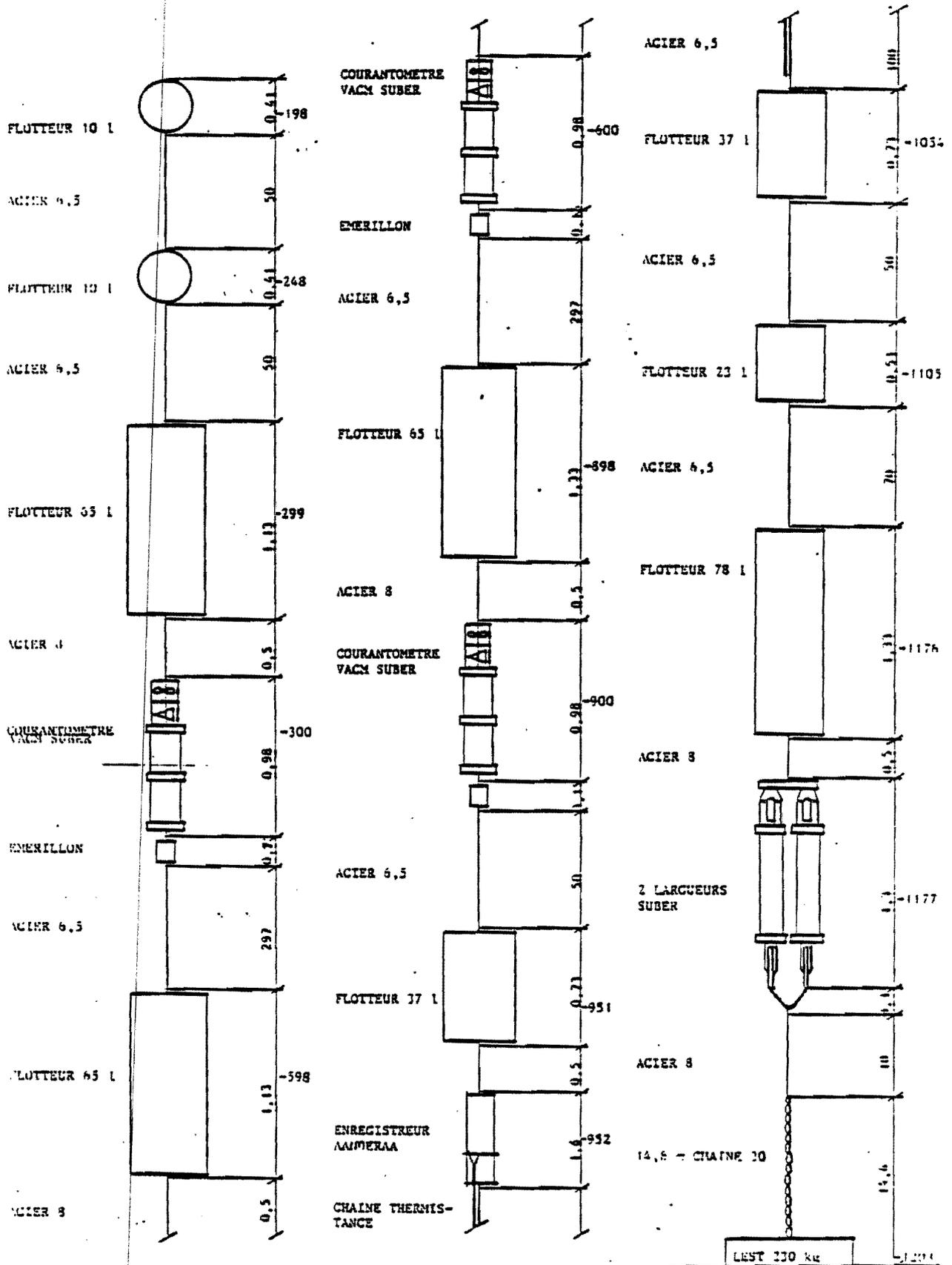
SCHEMA LIGNE 1



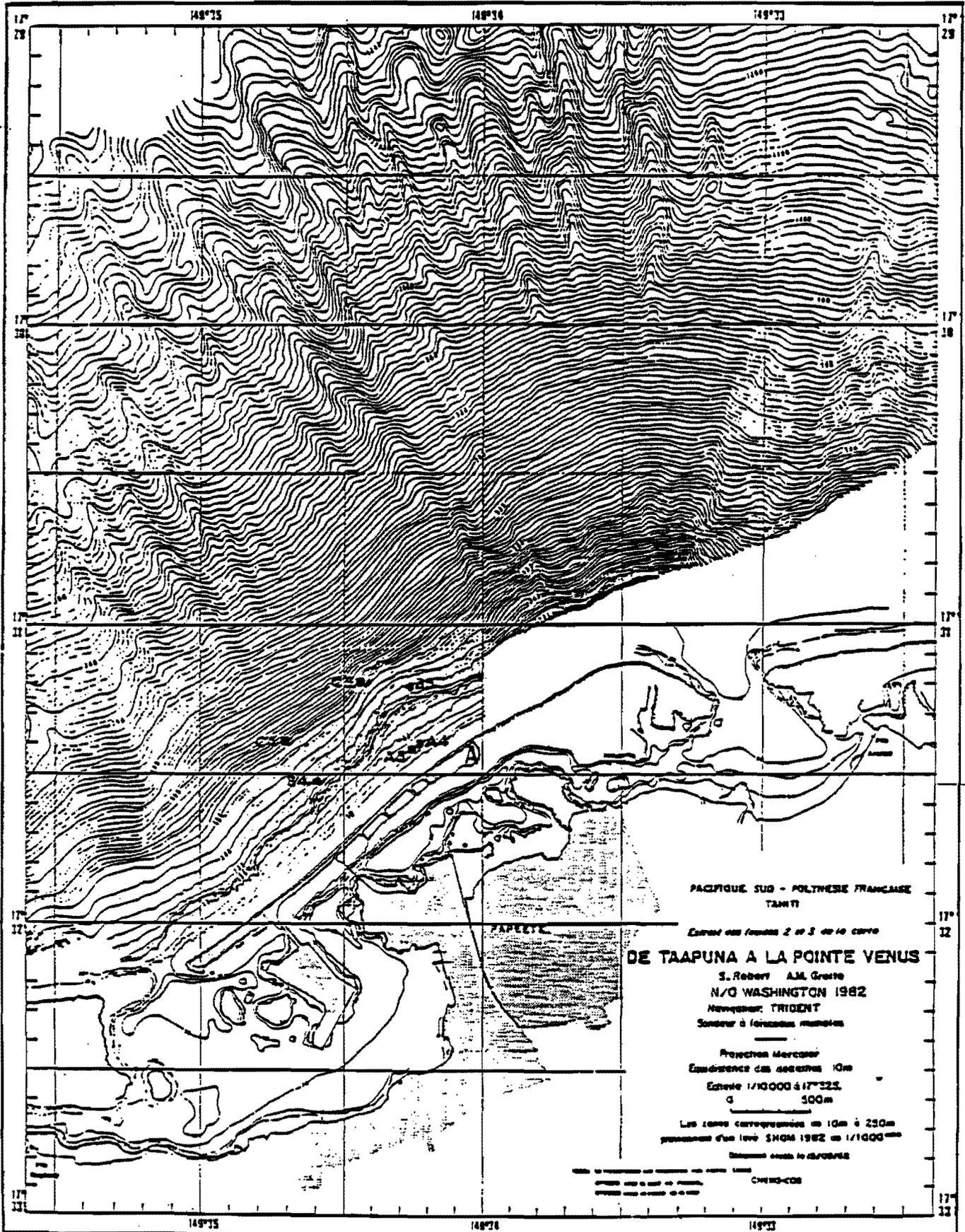
SCHEMA LIGNE 7



SCHEMA LIGNE 5



CAMPAGNE ETM LOCALISATION DES MOUILLAGES



MOUILLAGES ETM

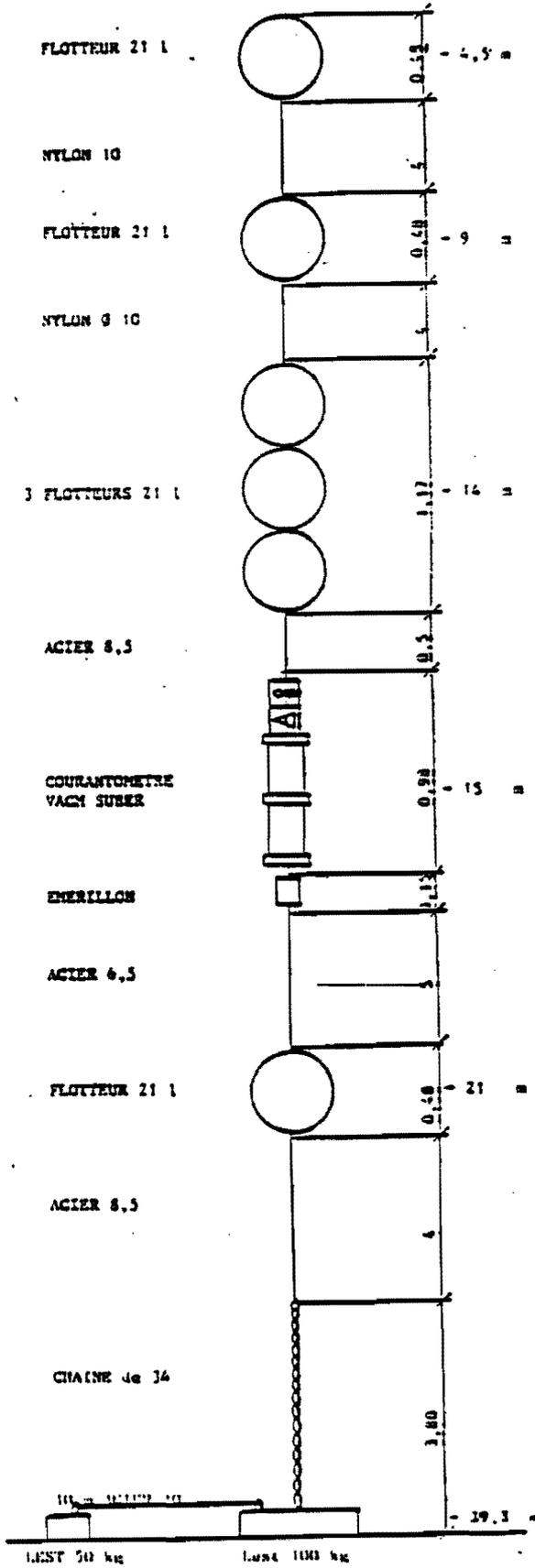
4^e campagne

				1983		1984					
				NOVEMBRE	DÉCEMBRE	JANVIER	FÉVRIER	MARS			
POINT A4	17° 31', 38 S	LIGNE 1	- 15 m	2	C 163	(P.t. D.V.)			16		
	149° 34', 23 W										
POINT B4	17° 31', 52 S	LIGNE 3 - 20 à 120 m	- 20 à 120 m	1	T 238	(P.t. tous les 10 m)			15		
	149° 34', 60 W										
									1	C 132	15
									- 122 m		(P.t. D.V.)
			1	C 131	14		(P.t. D.V.)				
			- 200 m				(P.t. D.V.)				
POINT C4	17° 31', 32 S	LIGNE 4	- 200 m	2	C 135	(P.t. D.V.)			15		
	149° 34', 71 W										
									2	C 162	15
									- 300 m		(P.t. D.V.)
			2	C 136	15		(P.t. D.V.)				
			- 400 m				(P.t. D.V.)				

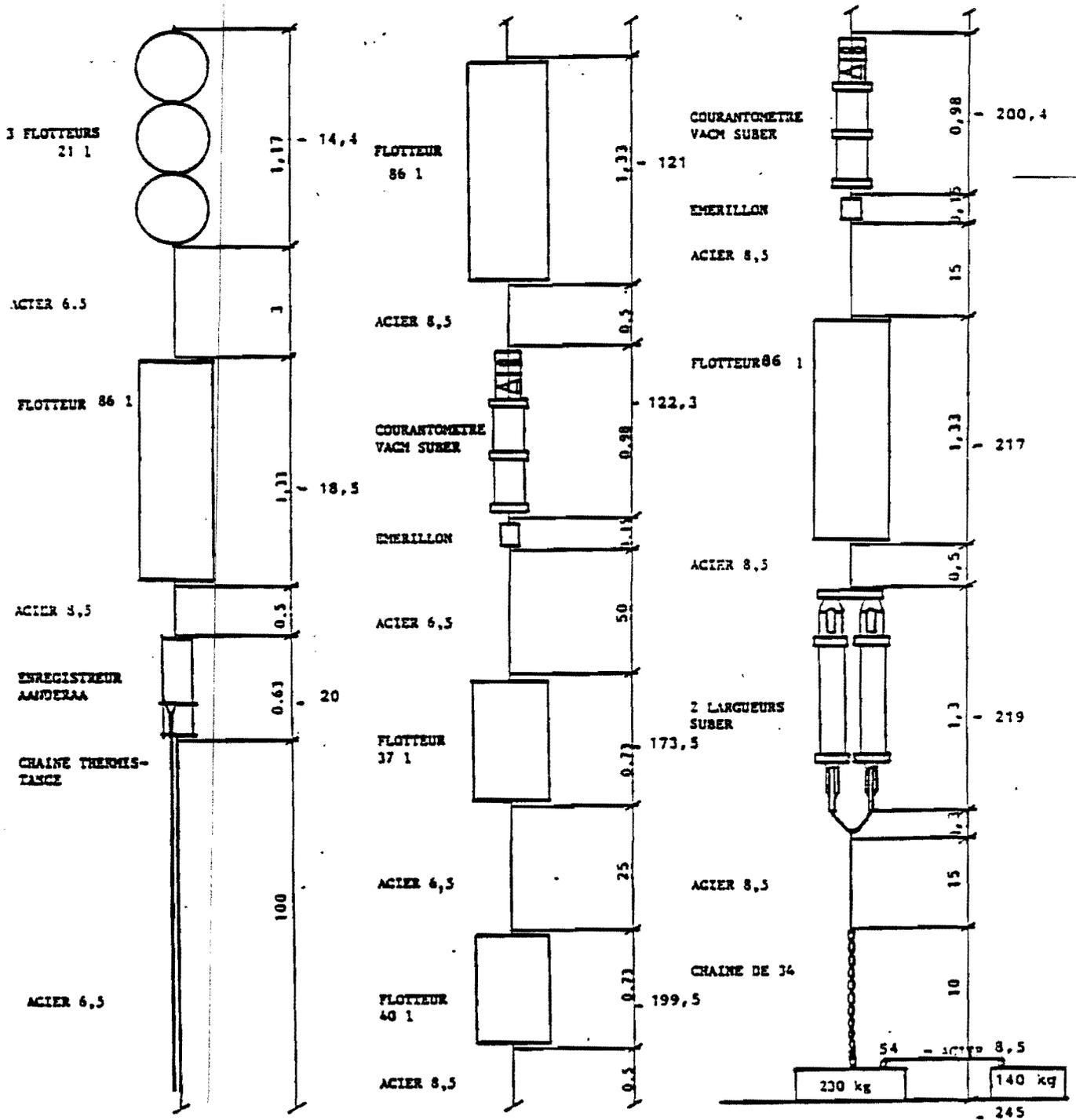
Légendes

C : Courantographe VACM SUBER
 T : Chaîne Aanderaa de 100 m, 1 thermistance tous les 10 m
 p : Profondeur en dBars
 t : Température en degrés C
 D : Direction du courant en degrés
 V : Vitesse de courant en cm/s

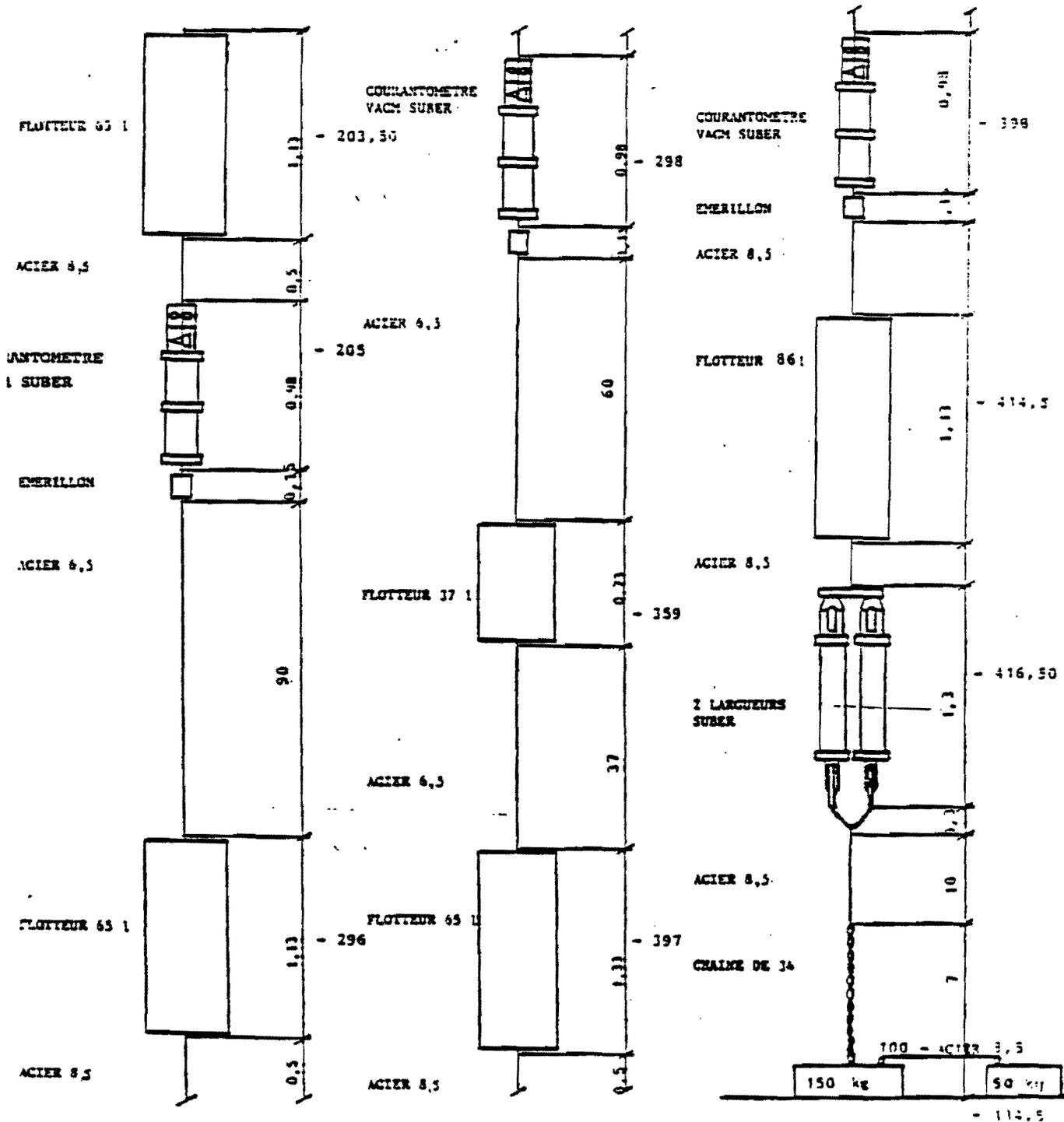
SCHEMA LIGNE 1



SCHEMA LIGNE 3



SCHEMA LIGNE 4



MOUILLAGES ETM

5^e campagne

1984

AVRIL

MAI

JUN

JUILLET

AOUT

SEPT.

OCTOBRE

LIGNE 1 TER

POINT 17° 31', 37 S
A5 149° 34', 26 W

¹² C 70
- 30 m

23

(P.t. D.V.)

LIGNE 3

POINT 17° 31', 24 S
B5 149° 34', 27 W

⁹ T 238
- 20 à 120 m

22

(P.t. tous les 10 m)

⁹ C 132
- 122 m

22

(P.t. D.V.)

⁹ C 192
- 200 m

22

(P.t. D.V.)

LIGNE 4

POINT 17° 31', 21 S
C5 149° 34', 44 W

¹⁰ C 135
- 200 m

22

(P.t. D.V.)

¹⁰ C 133
- 300 m

22

(P.t. D.V.)

¹⁰ C 190
- 400 m

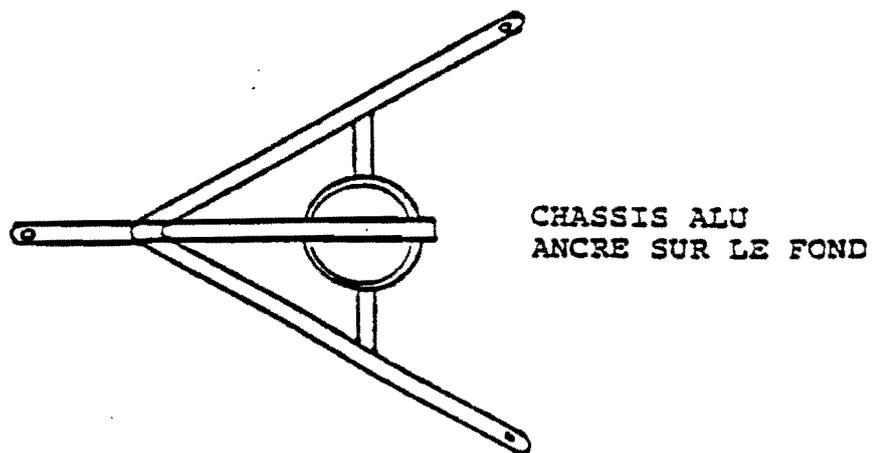
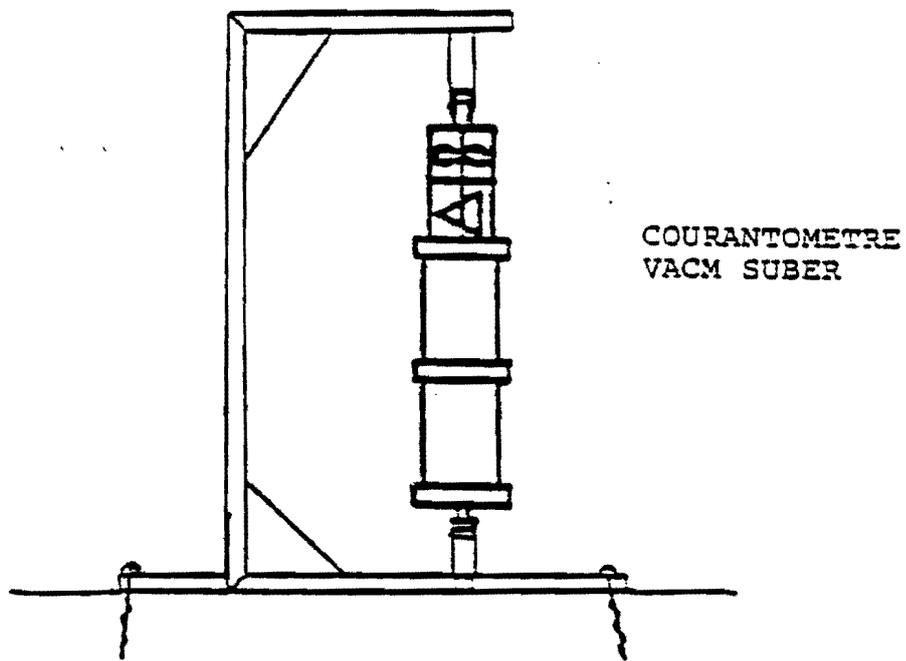
22

(P.t. D.V.)

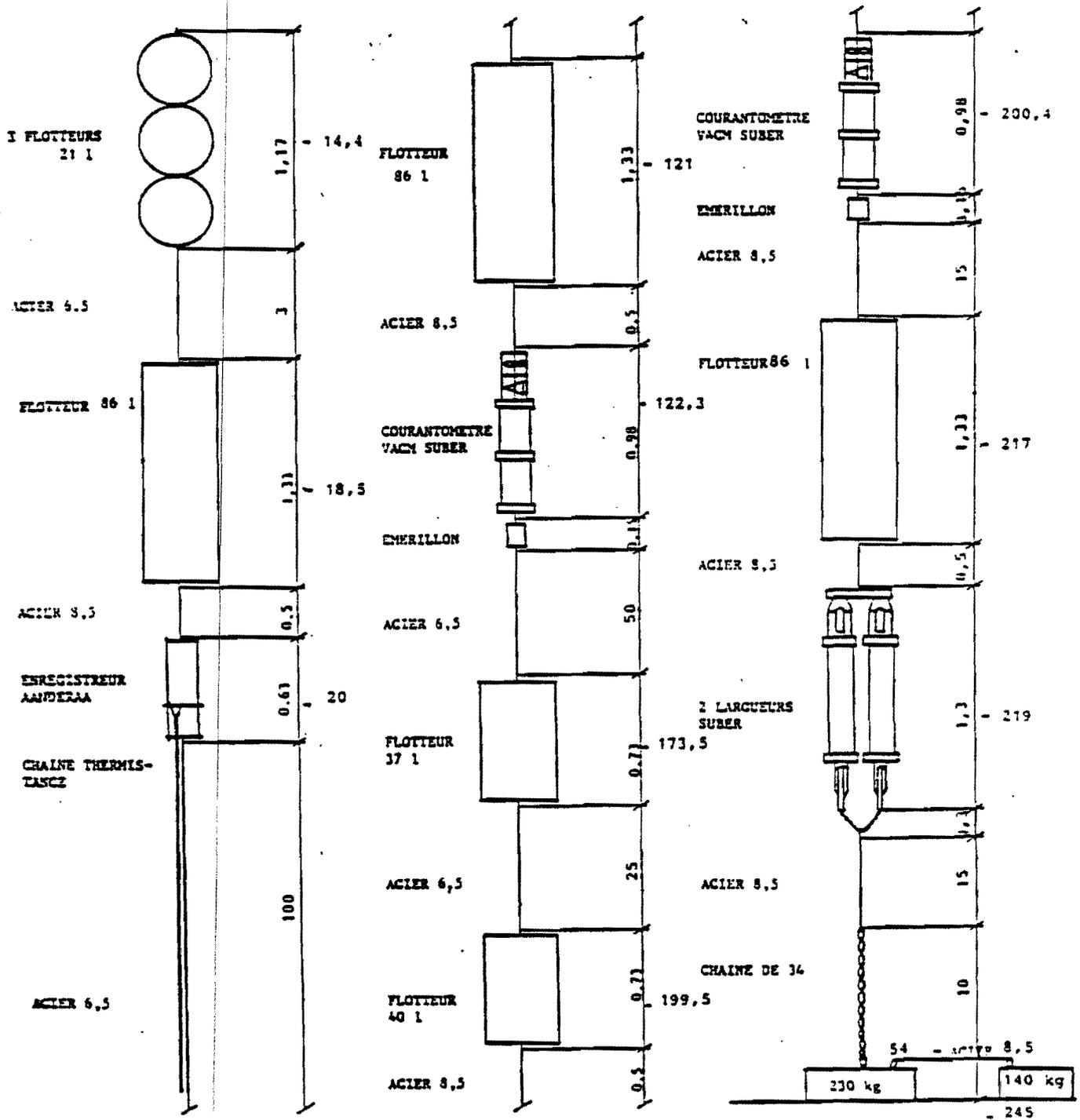
Légendes

- C : Courantographe VACM SUBER
T : Chaîne Aanderaa de 100 m, 1 thermistance tous les 10 m
p : Profondeur en dBars
t : Température en degrés C
D : Direction du courant en degrés
V : Vitesse de courant en cm/s

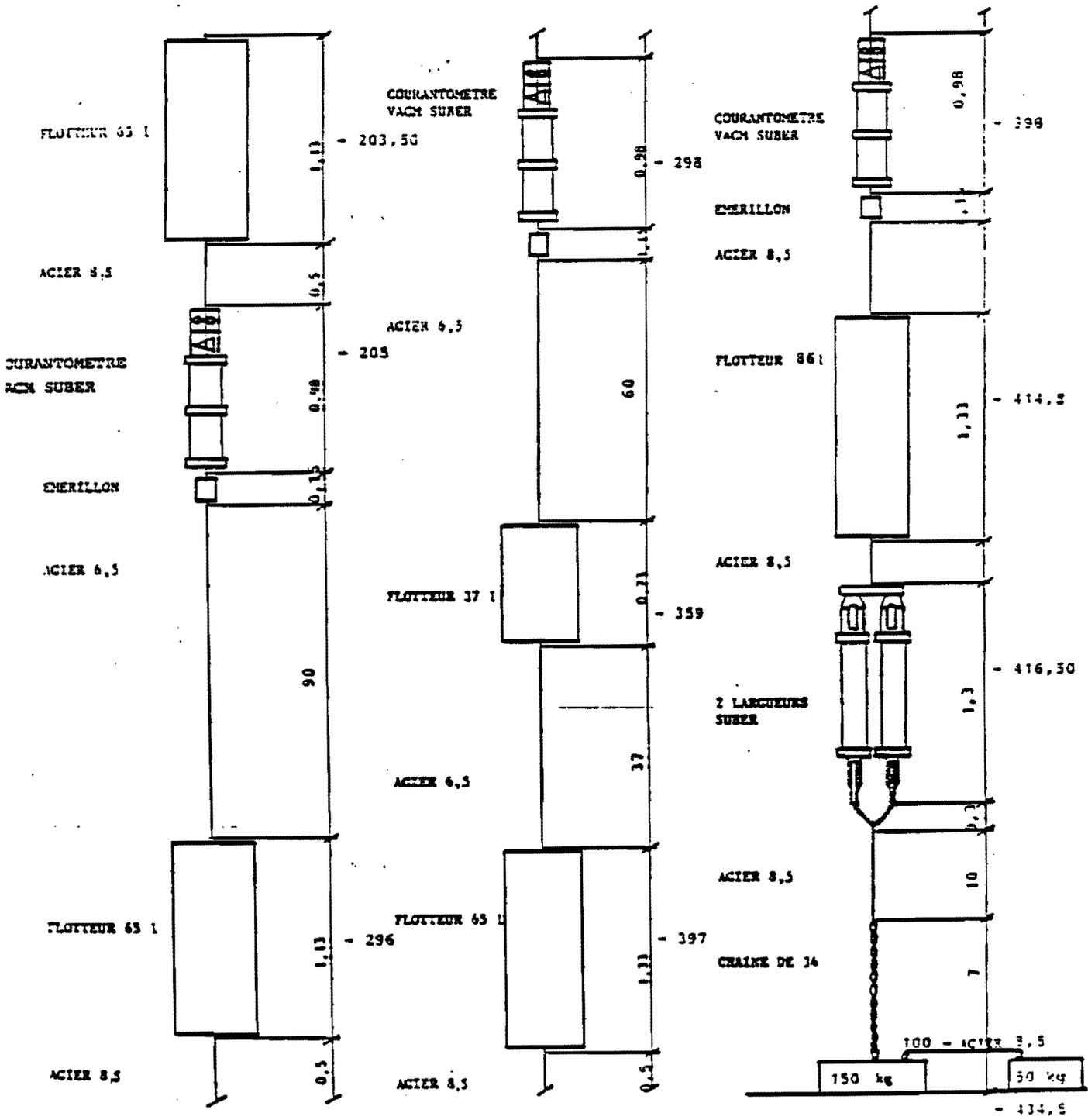
SCHEMA LIGNE 1 TER



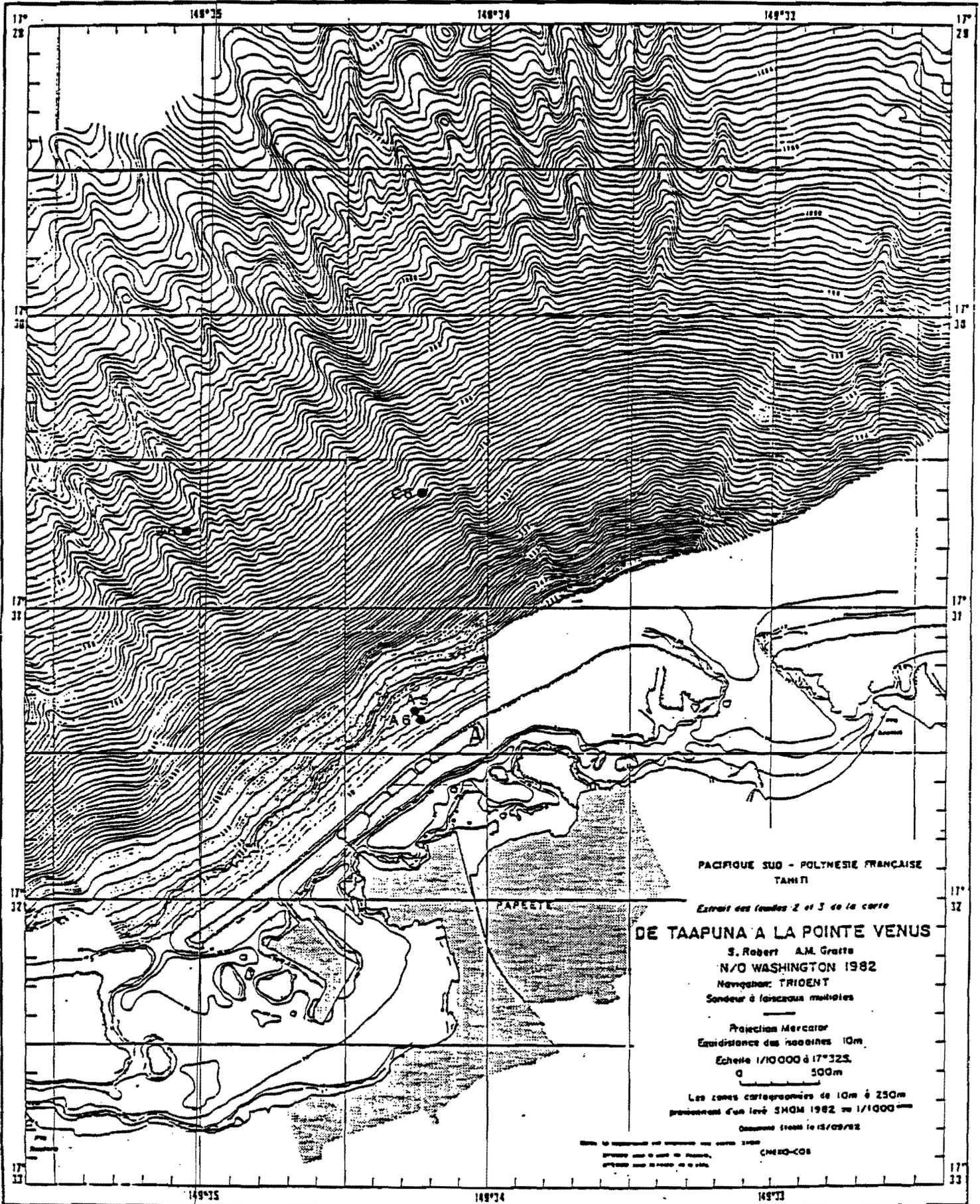
SCHEMA LIGNE 3



SCHEMA LIGNE 4



CAMPAGNE ETM LOCALISATION DES MOUILLAGES



PACIFIQUE SUD - POLYNESIE FRANCAISE
TAHITI

Extrait des feuilles 2 et 3 de la carte

DE TAAPUNA A LA POINTE VENUS

S. Robert A.M. Gratta
N/O WASHINGTON 1982
Navire: TRIGENT
Sondeur à faisceau multiple

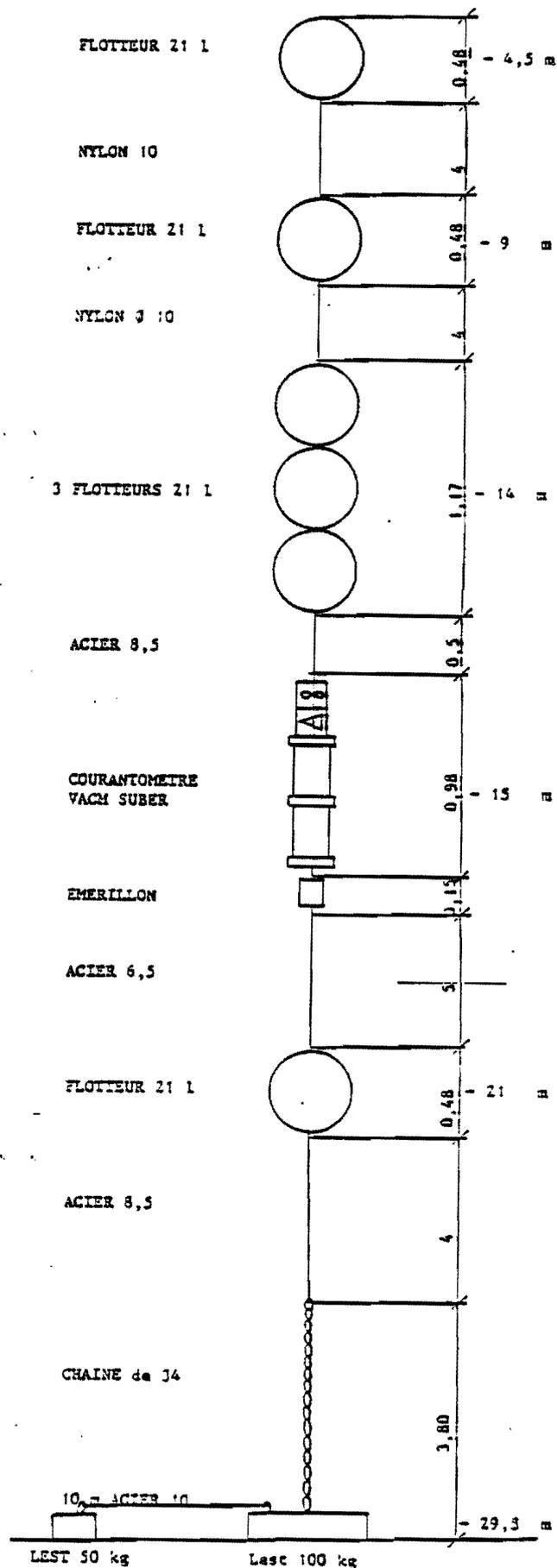
Projection Mercator
Equidistance des parallèles 10m
Echelle 1/10000 à 17°32S
0 500m

Les zones cartographiées de 10m à 250m
proviennent d'un levé SHOM 1982 au 1/1000

Date: 13/09/82

CHM20-C08

SCHEMA LIGNE 1



SCHEMA LIGNE 9

