

L'HABITAT DU COELACANTHE AUX COMORES :
QUELQUES DONNEES D'ENVIRONNEMENT PHYSIQUE
(NOVEMBRE - DECEMBRE 1989)

Bernard PITON, ORSTOM, BREST

**Lüdz KASANG, MAX-PLANCK INSTITUT FÜR VERHALTENSPHYSIOLOGIE,
SEEWIESEN, R.F.A.**

Francis MARSAC, ORSTOM, LA REUNION

Raphaël PLANTE, CENTRE D'OCEANOLOGIE DE MARSEILLE

CONVENTION FAC N° 122/CD/89

Document scientifique ORSTOM Brest, n° 58, 1990

CONDENSE EN ANGLAIS	2
1 - INTRODUCTION	5
2 - METHODES DE MESURES	5
3 - BILAN DES MESURES	6
3.1 - Mesure de la température de surface	6
3.2 - Mesures CTD (salinité, température et profondeur) à l'aide de la bathysonde SEA BIRD	6
3.3. - Mesures en point fixe par appareils AANDERAA (courantomètre et chaîne à thermistances)	9
4 - COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS	10
4.1 - Environnement général	10
4.1.1 - Météorologie	10
4.1.2 - Courants	12
4.1.3 - Hydrologie	12
4.2 - Environnement rapproché	14
4.2.1 - Courants et température	14
4.2.2. - Température et salinité	16
5 - CONCLUSION	17

FIGURES

CONDENSE EN ANGLAIS

HABITAT OF THE COELACANTH AT COMOROS ISLANDS :

SOME PHYSICAL ENVIRONMENTAL DATA

(NOVEMBER - DECEMBER, 1989)

GENERAL ENVIRONMENT

Meteorology

The wind and rain conditions (as well as atmospheric pressure) during November 1989 were typical of a transitional condition between the trade-winds period (from April to September) and the hot season which began about December 2 ("Kashikazi" in Anjouan). This was clearly different from what was observed in 1988 for example where the NE monsoon began as early as October (the "Kashikazi" in our case was two months late).

The average rainfall regime varies between 1-2 m per year in the Comoros surroundings and more than 2 m on the windward heights, with a dry season from May to November and a rainy one from December to April (PITON and MAGNIER, 1975). 1989 was more rainy than the average (1863 mm in Hahaya - average : 1 232), but the relatively dry season lasted very long (from May to November).

When accepting as the monthly average value 100 mm, one gets a cumulated balance of evaporation/rain of 500 mm during that period (see later on the influence on salinity). Rainfalls are much more intense in heights : 5 200 mm in Majaridjou (260 m alt.) and more than 6 m on southern slopes of the Kartala.

Currents

Close to the coast they depend upon the semidiurnal tides (1.6 m < amplitude < 3,6 m). In Itsundzu, the surface currents were alternative bearing to west at flood tide and east at ebb tide with speeds \leq 1knot

In the open sea, speeds are higher and may reach 2 knots : we had an example during the night 27-28 November when the "Sea Eagle" drifted to S - SE (a return branch of the anticyclonic system).

Hydrology

The average profile of the 400 first meters ("LEVITUS" file) comprises :

- a homogeneous layer (40 to 80 m) with salinity 35‰ and $25^{\circ}\text{C} < \text{temperature} < 29^{\circ}\text{C}$,
- a transition layer (the thermocline) 300 m thick. Temperature decreases from $24/25^{\circ}\text{C}$ to $11/12^{\circ}\text{C}$, and S ‰ maximum may be more than 35.25 ‰.

Our data exhibited surface salinity values very high (up to 35.4 ‰ before rains began in Itsundzu). In the very first centimeters, low salinities were sometimes related to coastal freshwater outlets.

In deeper layers between 190 and 300 m deep were 3 "digitations" 2 to 20 m thick with $S \text{ ‰} \geq 35,4 \text{ ‰}$, temperature dropping intensively at the same levels. This is the "subsuperficial layer of waters coming from the east coast of Madagascar", MAGNIER and PITON (1974).

The 18°C isotherm was much deeper in our cruise in 1989 (240-250 m) than in 1987 (170-180 m), due to an exceptionally important anticyclonic circulation around the Comoros in 1989 (monthly charts of NOAA). In short : superficial drought and heating ---> increase of the salinity ---> deepening of isotherms ---> deepening of the thermocline.

Because of the locations of our observations we could not ascertain the existence of any upwelling on the leeward side of the island.

CLOSE ENVIRONMENT

Currents

In the deep currents were generally weak with some exceptions : on the 26 November (23 h), we had a NW current of 1 knot at 150 m and 30 minutes earlier a much lower one bearing SE at 200-250 m.

On several occasions such inversions ("cuts") were observed between both sides of 200 m isobath.

At 158 m (3 days), the current speeds were lower than $2 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ for 34 % of observations and twice higher than $15-16 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ ($\approx 0,3$ knot).

The average was $4.1 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$ and the dominant direction was S.W. Such a dissymmetry gives a residual drift of 7 km to the 246° with a non negligible speed of $2.1 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$.

These observations were made nearby the top part of the thermocline.

At 200 m (17 days), the axis of the general record is slightly different from the coast direction. The residual drift is of 11 km to the 30° with an average speed of $0.7 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-1}$,

i.e. a general trend towards the coast. The recorder was clearly within the thermocline. Unfortunately it was not possible - according to the lack of sensibility of the apparatus - to give clear evidence of internal waves. Nevertheless the maximal amplitude of temperature variations on short terms (6.3°C) when measured in the thermocline, suggests that the amplitude of internal waves may be about 60 m - which agrees with indications given by the thermistances chain : maximal amplitude of 5°C around 215 m with 2 main waves per 24 h (possible harmonics of shorter duration).

Temperature and salinity

When the bathysonde was used on fixed positions it gave further indications on :

- temperature changes may be intense and fast (amplitude maximum $\approx 5^{\circ}\text{C}$ and changes may reach 2°C within 1 h). Once more : the same order of magnitude (≈ 60 m) of internal waves with a periodicity of 2 per 24 h. The main waves are related to the tides and secondary ones also reach the zone,
- the temperature range of the coelacanth is quite wide (19°C to 24.4°C instead of 17°C to 20°C in FRICKE and PLANTE, 1988),
- other remark : the caves with their inverted slopes may act as warm water traps,
- the question if possible outlets of low salinity waters in the deep is still open and must be put forward very cautiously, mainly because we cannot rely entirely on the temperature and salinity compensations of our apparatuses.

Modern theories of "endo-upwelling" (ROUGERIE and WAUTHY 1986 and also MINK 1964, SOUZA and VOSS 1987) propose an estuary-type circulation in volcanic areas with the geothermic convection acting as the energy-source.

They quote the "GHYBEN-MERZBERG principle" according to which, when the basal-water table is at 6 m higher than the sea level, one can have a possible layer of 240 m of freshwater in porous rocks below the sea level.

It would be exciting to put into a coelacanth cave one of the new "SEA-BIRD probe" with an additional pump which makes salinity measurements entirely reliable, and in the same time have a DOPPLER effect current meter moored on the bottom.

1 - INTRODUCTION

Le professeur Hans W. FRICKE du M.P.I.V., Seewiesen, R.F.A. a organisé avec son équipe : Jurgen SHAUER, électronicien - pilote de submersible , Karen HISSMAN, biologiste - secrétaire, Lüdiz KASANG, biologiste - second pilote, une campagne d'observations "in vivo" du comportement du coelacanthé (Latimeria Chalumnae) à partir d'un petit submersible, le JAGO, embarqué sur un navire type "Supply" de 54 mètres de long, le M/S SEA EAGLE II.

R. PLANTE, biologiste de la station marine d'Endoume, depuis plusieurs années associé scientifique français de H. FRICKE en ce qui concerne les recherches sur le coelacanthé, a co-organisé cette mission et a fait appel à B. PITON et F. MARSAC de l'ORSTOM pour effectuer un certain nombre de mesures d'environnement.

Cette campagne s'est déroulée du 29 octobre 1989 (départ de MOMBASA, Kénya) au 19 décembre 1989 (retour à MOMBASA) dans les eaux proches des îles Comores (Grande-Comore, Anjouan et Mohéli) ; elle faisait suite aux deux autres campagnes de décembre 1986 - janvier 1987 et de avril - mai 1987 au cours desquelles le coelacanthé avait été observé et filmé pour la première fois dans son milieu naturel. Quelques caractères originaux de son comportement avaient été mis en évidence : en particulier, utilisation apparente des ondes internes pour se déplacer le long des tombants à la recherche de nourriture (FRICKE et PLANTE, 1988). Il s'avérait donc intéressant de mieux connaître le milieu dans lequel vit cet animal par des mesures de courant, de température et de salinité dans le proche voisinage de son habitat, en relation avec le contexte marin du Nord du canal de Mozambique.

2 - METHODES DE MESURES

D'après FRICKE et PLANTE (1988), le coelacanthé vit entre 120 et 300 mètres de profondeur le long des tombants des îles de l'archipel des Comores de pente très accusée, voisine de 45°.

L'état de la mer le permettant, le navire mouillait tout près de la côte par 100 mètres de fond environ sur les sites choisis.

Le submersible JAGO pouvait ainsi transporter rapidement les 2 observateurs le long du

tombant. Un site très favorable à l'observation des coelacanthes a été rapidement trouvé, au Sud de la Grande-Comore, en baie d'Itsoundzou, largement ouverte vers le Sud - Sud-Ouest (fig. 1). C'est donc à cet endroit qu'ont été immergés le courantomètre et la chaîne à thermistances (longueur de 50 mètres) AANDERAA et qu'ont été effectuées de nombreuses mesures hydrologiques à l'aide de la bathysonde SEA-BIRD.

L'utilisation, improvisée sur place, du submersible pour placer les 2 premiers appareils à l'endroit désiré et surtout pour les récupérer en fin d'observations sans bouée de surface, ni déclencheur acoustique, a grandement facilité les manoeuvres.

Le faible poids de la bathysonde SEA-BIRD SBE 19 (5 Kg dans l'air, 1,2 Kg dans l'eau) a permis son utilisation soit à partir du canot de servitude, soit à partir du SEA EAGLE, à l'aide d'un simple cordage de ϕ 10 mm jusqu'à 400 mètres de profondeur au maximum. Autres modes d'utilisation de cette bathysonde : en point fixe posée sur le fond par le submersible ou comme thermosalinographe lorsque fixé sur le submersible lui-même en plongée.

3 - BILAN DES MESURES

3.1 - Mesure de la température de surface au thermomètre-seau à partir de SEA EAGLE 1 ou 2 fois par jour, et prise de 5 échantillons d'eau pour analyse de la salinité de surface lors des profils Sb 2, 12, 19, 20 et 21.

3.2 - Mesures CTD (salinité, température et profondeur) à l'aide de la bathysonde SEA BIRD

- 21 profils verticaux CTD, à intervalle de mesure de 0,5 seconde. Seules les données recueillies lors de la descente de l'appareil, capteurs vers le bas, à la vitesse voisine de 1 mètre par seconde, ont été retenues. Les coupes de répartition verticale de la température et de la salinité en baie d'Itsoundzou (fig. 2) ont été établies à partir de données interpolées à la main sur les profils verticaux, point par point, fournis par la bathysonde (profils Sb 4 à 11), tandis que les diverses courbes présentées ont été dressées à partir de données moyennées tous les 3 mètres.

Tableau résumant les caractéristiques de ces 21 stations

n° station	Date	Heure	Position *		Profondeur.
	1989	TL	Lat. S	Long. E	Maximum.
Sb. 01	15 nov.	11.22	11°52	43°20	230
Sb. 02	18 nov.	17.30	11°52	43°19	160
Sb. 03	21 nov.	09.15	11°52	43°20	185
Sb. 04	24 nov.	07.40	11°52	43°21	10
Sb. 05	24 nov.	07.44	11°52	43°21	30
Sb. 06	24 nov.	07.52	11°52	43°21	50
Sb. 07	24 nov.	08.00	11°52	43°21	100
Sb. 08	24 nov.	08.10	11°52	43°21	130
Sb. 09	24 nov.	08.20	11°52	43°21	160
Sb. 10	24 nov.	08.30	11°52	42°21	200
Sb. 11	24 nov.	08.45	11°52	43°21	230
Sb. 12	26 nov.	15.35	11°52	43°22	285
Sb. 13	26 nov.	16.10	11°52	43°22	340
Sb. 14	26 nov.	17.00	11°52	43°22	4
Sb. 15	1er déc	17.00	11°52	43°22	315
Sb. 16	1er déc	21.00	11°51	43°32	255
Sb. 17	1er déc	23.20	12°02	43°40	300
Sb. 18	02 déc.	03.50	12°05	44°05	270
Sb. 19	04 déc.	17.25	12°20	44°10	85
Sb. 20	05 déc.	20.30	12°14	43°33	780
Sb. 21	05 déc.	23.30	12°00	43°26	525

* Aucune précision supplémentaire sur la position n'est donnée volontairement .

- 4 "points fixes"

Le submersible posait la bathysonde sur le fond près d'un lieu de vie des coelacanthes pour la mesure de la profondeur, la température et la salinité à des intervalles préprogrammés en fonction de la durée des observations à effectuer.

S' il n'y a aucune réserve à faire sur la qualité des mesures de la profondeur et de la

température, il convient de souligner que pour la mesure de la salinité, la bathysonde ne "travaillait" pas dans les meilleures conditions du fait de la faiblesse de la vitesse de renouvellement de l'eau arrivant au capteur de conductivité, qui n'a pas en outre la même constante de temps que le capteur de température.

Tableau donnant les caractéristiques des "points fixes"

n° du point	Position		Durée heure	Date et heures (TL) des mesures	Intervalle (secondes)
	Lat.S	Long.E			
pf 01	11°52	43°20	23	du 11 nov à 14H30 au 12 nov à 13H30	120
pf 02	11°52	43°20	40	du 12 nov à 18H au 14 nov à 10H00	130
pf 06	11°52	43°20	4,43	du 19 nov à 13H au 19 nov à 17H30	30
pf 16	11°52	43°20	22	du 6 déc à 12H au 7 nov à 10H	30

Les courbes présentées sont établies à partir de moyennes calculées sur 10 relevés, quelque soit l'intervalle de mesure.

- 13 profils "bathythermosalinogrammes", obtenus par la bathysonde fixée sur le submersible lors de ses plongées, capteur vers l'avant, lors de certaines de ses plongées jusqu'à 400 mètres de profondeur au maximum le long du talus continental. Ce renouvellement de l'eau autour des capteurs est très satisfaisant, mais la présence de bulles d'air, nombreuses surtout lors de la remontée de JAGO, peut perturber de façon importante la mesure de la conductivité.

Tableau donnant les caractéristiques des enregistrements
de la bathysonde fonctionnant en "bathythermosalinographe"

n° enr gistr.	Nom du site*	Date 1989	Heure début TL	Interv- alle	Durée (heure, mn)
pf 03	Singani	17 nov.	18.30	10	0.37'
pf 04	Singani	18 nov.	10.22	10	3.37'
pf 05	Singani	18 nov.	19.39	10	3.21'
pf 07	Bambani	19 nov.	11.30	30	1.38'
pf 08	Dzahadzou	23 nov.	09.07	10	1.48'
pf 09	Dzahadzou	24 nov.	09.15	10	3.47'
pf 10	Dzahadzou	25 nov.	09.30	10	0.20' (panne)
pf 11	Dzahadzou	25 nov.	13.15	10	5.10'
pf 12	Itsoundzou	26 nov.	09.45	10	3.57'
pf 13	Mutsamudu	3 déc.	07.43	60	2.53'
pf 14	Sima	3 déc.	15.05	10	2.27'
pf 15	Mohéli	5 déc.	08.39	10	2.22'
pf 17	Itsoundzou	10 déc.	13.01	30	5.00'

* C'est le nom d'un village (ou d'une île) proche du lieu de la plongée du submersible

3.3. - Mesures en point fixe par appareils AANDERAA (courantomètre et chaîne à thermistances)

Le courantomètre a été immergé le 15 novembre 1989 (intervalle de 10 minutes, premier cycle retenu à 14H30 TL) par fond de 161 mètres, l'appareil étant maintenu à 3 mètres au-dessus du lest par des bouées NOKALON. Etant situé trop au-dessus du site à coelacanthés, il a été replacé plus bas sur fond de 203 mètres le 19 novembre 1989 (premier cycle retenu à 13H50 TL) où il a fonctionné jusqu'au 6 décembre 1989 (dernier cycle retenu à 12H20).
Nombre total de cycles retenus : 3 010.

Cet appareil avait auparavant travaillé de façon intensive pendant 2 ans en point fixe sur fond de 17 mètres à l'extrémité du WHARF de Pointe-Noire. Bien qu'entièrement révisé, il a donné quelques signes d'usure : le capteur de pression n'est plus fiable et il ne semble pas que les indications du capteur de température soient transcrites sur la bande magnétique de

façon satisfaisante (trop de paliers). Ce manque apparent de sensibilité de l'appareil est retrouvé dans la répartition des directions. Les mesures de vitesse semblent correctes. Quant aux salinités, elles n'ont pas été retenues.

La chaîne à thermistances (50 mètres) a été immergée le 22 novembre 1989 (intervalle de 5 minutes, premier cycle retenu à 08H50) sur fond de 220 mètres, chaîne maintenue verticale entre lest et bouées NOKALON. Cet appareil a été relevé le 6 décembre 1989 (dernier cycle retenu à 13H). Nombre de mesures : 4 106. De même que le courantomètre, cette chaîne à thermistances a donné des signes de vieillissement, bien qu'entièrement révisée auparavant, d'où un mauvais fonctionnement de la plupart des capteurs de température.

4 - COMMENTAIRES SUR LES RESULTATS

Tous les résultats des mesures décrites dans le chapitre précédent sont archivés au centre ORSTOM de Brest. Ne seront traités ici sous forme de graphiques que ceux qui apportent une information intéressante sur le milieu dans lequel vivent les coelacantes ou peuvent alimenter des hypothèses à vérifier ultérieurement, éventuellement.

4.1 - Environnement général

4.1.1 - Météorologie

Le mois de novembre est un mois de transition entre la période hivernale des alizés de secteur Sud-Est, largement dominant sur tout le canal de Mozambique du mois d'avril au mois de septembre et la période estivale de vent de directions variables, faiblement dominant du Nord, du fait de l'installation des basses pressions sur le canal de Mozambique avec dépressions tropicales assez fréquentes et parfois cyclones (PITON, 1989). La pression atmosphérique est restée voisine de 1 014 millibars durant le mois de novembre, ce qui traduit bien cet état de transition, avec des vents relativement faibles (vitesses inférieures à 10 noeuds) et de directions très variables (du Nord-Ouest, Ouest, Sud-Ouest et Sud-Est) tout près de la côte Sud - Sud-Ouest de la Grande Comore (régime perturbé par cette proximité de la terre).

Cependant, la transition entre saison des alizés et saison chaude peut être considérée comme terminée en fin du mois de novembre avec pluie en mer à partir du 20 novembre, coup de "cachi-cazi" (vent de Nord - Est) le 2 décembre à Anjouan, s'apparentant à la mousson de secteur Nord attirée par les basses pressions du canal de Mozambique. Ces appréciations

locales sont corroborées par les cartes mensuelles de pseudo-tensions de vent calculées sur l'Océan Indien tropical par O'BRIEN et STRICHERZ (1988 et 1989) : on peut voir sur la figure 3 que les alizés de Sud - Sud-Est, encore très bien établis en octobre 1989 au Nord du canal de Mozambique, sont "attirés" vers la partie centrale du canal en novembre 1989, créant un régime transitoire de mousson locale de Nord-Est sur l'archipel des Comores, très différent de la situation observée en octobre 1988 par exemple, où les alizés de Sud-Est s'estompent peu à peu pour être remplacés par la mousson de Nord-Est issue de la Mer d'Arabie.

Les quantités annuelles de pluies tombant sur le pourtour des îles Comores sont de 1 à 2 mètres, mais peuvent dépasser les 2 mètres sur les hauteurs situées au vent dominant, avec une période sèche de mai à novembre et une période pluvieuse de décembre à avril (PITON et MAGNIER, 1975). Cette division de l'année pluviométrique en 2 périodes distinctes est bien visible sur la figure 4, où l'on voit qu'il ne tombe en moyenne (1982 - 1988) que 265 mm de pluie en saison sèche contre 997 mm en saison des pluies à l'aéroport d'Hayaya sur la côte Ouest de la Grande Comore.

En 1989, la quantité totale de pluies à l'aéroport est assez nettement supérieure (1 863 mm) à la moyenne (1 232 mm), avec un maximum très important de 651 mm en janvier 1989, mais la période de faibles pluies a duré du mois de mai jusqu'à fin novembre avec un total cumulé faible de 217 mm durant cette période de près de 7 mois*.

Si l'on retient comme évaporation moyenne mensuelle possible la hauteur de 100 mm, comme celles mesurées à la station météorologique des îles Glorieuses (PITON et MAGNIER, 1975), on constate un excédent cumulé de l'évaporation sur les pluies de l'ordre de 500 mm durant cette période. Cependant, la côte Sud-Ouest de la Grande Comore est nettement plus arrosée que la côte Ouest d'après les résultats communiqués par la météorologie comorienne : par exemple, à Salimani, seuls les mois d'août, septembre et octobre sont déficitaires en pluies (fig. 4). Mais la grande particularité de la répartition spatiale des pluies est évidemment liée à l'influence du relief. Ceci est illustré par la répartition des quantités mensuelles de pluies recueillies à la station de Majaridzou située à 260 mètres d'altitude : la quantité totale de pluies y a été en effet de 5 200 mm en 1989 (fig. 4), des quantités annuelles dépassant les 6 mètres ayant déjà été mesurées en d'autres endroits sur les versants exposés aux vents du secteur Sud du Mont Kartala (2 361 m) selon CORMILLOT (communication personnelle).

* Ceci confirme les dires d'un pêcheur comorien du village de N'Bambani nous signalant qu'il n'avait pas plu depuis 7 mois

Nous ne disposons pas actuellement de renseignements sur la pluviométrie dans les autres îles de l'archipel, mais il doit être trouvé, aussi bien à Anjouan (dominé par le pic d'Anjouan culminant à 1 595 mètres) qu'à Mohéli avec le Mont Koukouli à 790 mètres, un même type de répartition des pluies, relativement faibles au niveau de la mer sous le vent des montagnes et importantes sur les versants exposés aux vents dominants. Il est cependant remarquable de constater la présence de rivières et ruisseaux dans ces deux dernières îles, alors que l'on n'en voit pas à la Grande Comore, sauf lors de fortes averses (voir à ce sujet les cartes à petite échelle de l'archipel des Comores du Service Hydrographique Français).

4.1.2 - Courants

Tout près de la côte, la direction des courants superficiels est sous la dépendance de la marée assez importante dans l'archipel des Comores. En effet, c'est une marée semi-diurne à faible inégalité diurne, avec un marnage maximum de 3,6 mètres en vive-eau et de 1,6 mètre en morte-eau à Moroni, contre 3,2 mètres et 1,4 mètre à Anjouan. En baie d'Itsoundzou, le courant de surface était alternatif, portant à l'Ouest en marée descendante, à l'Est en marée montante, avec des vitesses pouvant atteindre 1 noeud au maximum.

Plus au large, les courants de surface peuvent atteindre des vitesses plus grandes. Une représentation possible de la circulation superficielle dans la partie Nord du canal de Mozambique en relation avec la branche Nord du courant Sud-équatorial doublant le cap d'Ambre et se divisant à nouveau au niveau du cap Delgado est donnée par la figure 5 : on voit que peut se développer dans cette zone comprise entre l'Afrique et Madagascar une circulation anticyclonique convergente, les eaux les plus légères s'accumulant au centre de la zone sous l'action de la force de Coriolis, avec enfoncement de la thermocline. Le développement prématuré d'une mousson de Nord-Est sur la zone comme il a été vu précédemment ne peut que favoriser une telle circulation. On peut même penser que la dérive de 2 noeuds vers le Sud - Sud-Est observée durant la nuit du 27 au 28 novembre 1989 dans le proche large de la baie d'Itsoundzou peut être la conséquence d'un flux de retour vers l'Est dans ce système de courant anticyclonique.

4.1.3 - Hydrologie

Les caractéristiques hydrologiques des 400 premiers mètres dans la partie Nord du Canal de Mozambique peuvent être caractérisées comme suit, d'après les profils moyens de température et de salinité tirés de la climatologie "LEVITUS" (fig. 6) :

- Une couche homogène de 40 à 80 mètres d'épaisseur selon les saisons, de salinité voisine

de 35°/oo et de température évoluant entre 25°C et 29°C,

- Une couche de transition, la thermocline, de 300 mètres d'épaisseur environ où la température décroît de 24-25°C jusqu'à 11-12°C vers 400 mètres de profondeur et où la salinité atteint des valeurs maximales pouvant dépasser 35,25°/oo.

Par rapport à ces profils verticaux moyens, on peut voir sur les figures 7a et 8 que les isothermes situées dans la thermocline sont trouvées à des profondeurs nettement plus importantes en novembre 1989 : par exemple, l'isotherme 20°C est située vers 220 - 230 mètres de profondeur contre 150 mètres en moyenne.

Lors de la campagne "Coelacanthé" de décembre 1986, l'isotherme 18°C avait été trouvée vers 170 - 180 mètres contre 240 - 250 mètres en novembre 1989. On peut expliquer cet approfondissement relatif des isothermes par le développement exceptionnellement important en fin 1989 de la circulation de type anticyclonique autour de l'archipel des Comores. Ce réchauffement progressif de l'eau de surface entre l'hiver austral et l'été qui passe de 26°C en octobre à 29°C en novembre, d'après les cartes mensuelles NOAA, s'ajoutant à l'augmentation progressive de la salinité sous l'effet de l'excédent d'évaporation, ne peut en outre que faciliter l'enfoncement de cette thermocline. Effectivement, la température de surface la plus faible mesurée a été de 26,6°C le 10 novembre 1989 et la température la plus élevée, 29°C, le 6 décembre 1989.

L'isotherme 20°C située vers 220 mètres de profondeur dans la baie d'Itsoundzou est trouvée entre 190 et 232 mètres plus au large dans l'archipel.

La salinité de surface a été trouvée nettement supérieure à 35°/oo, jusqu'à 35,40°/oo, en baie d'Itsoundzou avant les pluies du 20 novembre 1989, ainsi qu'au large et au voisinage des îles Anjouan et Mohéli en début décembre 1989 : ceci peut être la conséquence de l'excédent local de l'évaporation sur les pluies. Sur la coupe présentée (fig. 7b), effectuée le 24 novembre en baie d'Itsoundzou, il est observé par contre une dessalure juste superficielle, sur 3 - 4 mètres d'épaisseur, la plus faible salinité mesurée étant 34,70°/oo tout près de la côte avec léger refroidissement ($T = 26,8^{\circ}\text{C}$ contre $27,3^{\circ}\text{C}$). La salinité reste voisine de 35,30°/oo au delà de ces quelques mètres superficiels, légèrement supérieure à cette valeur jusque vers 50 mètres et légèrement inférieure jusqu'à l'immersion 190 mètres. Entre 190 mètres et 300 mètres se succèdent ensuite 3 "langues," de 2 à 20 mètres d'épaisseur, à salinité supérieure à 35,40°/oo et atteignant même 35,50°/oo vers 220 mètres de profondeur ; aux mêmes niveaux sont observés des paliers dans la décroissance de la température en fonction de la profondeur. On retrouve là traces de ce

que MAGNIER et PITON (1974) ont appelé l'eau subsuperficielle de l'Est de Madagascar entraînée par le fort courant superficiel se développant devant le cap d'Ambre vers l'Ouest, et donc décelables en "langues" plus ou moins développées et plus ou moins fugaces dans la partie Nord du canal de Mozambique (GOURIOU et al., 1991).

4.2 - Environnement rapproché

L'objectif est de trouver dans le tout proche environnement du Coelacanthe une ou plusieurs caractéristiques du milieu pouvant être retenues comme étant intéressantes dans la compréhension de son existence actuelle aux Comores et peut-être ailleurs.

4.2.1 - Courants et température

En profondeur sur les tombants, les courants observés à partir du submersible sont en général faibles, sauf exceptions : par exemple, le 26 novembre vers 23 heures, en début de marée montante de vive-eau, le sous-marin a subi un courant de vitesse supérieure à 1 noeud portant au Nord-Ouest par 150 mètres de profondeur, alors que 30 minutes auparavant, le courant portait au Sud-Est nettement plus faible, mais par 200 - 250 mètres de profondeur. Le même type d'observation suggérant un cisaillement dans le profil vertical de la répartition du courant de part et d'autre de l'immersion 200 mètres environ a été relevé le 30 novembre.

L'immersion d'un courantomètre effectuant un cycle de mesures toutes les 10 minutes avait pour but de connaître la relation entre les courants au voisinage immédiat de l'habitat du Coelacanthe et les ondes internes, y compris la marée évidemment.

L'appareil a d'abord été placé par 158 mètres de profondeur pendant 3 jours, puis à 200 mètres pendant 17 jours.

- A 158 mètres de profondeur, les vitesses du courant ont été inférieures ou égales à 2 cm/s dans 34 % des cas et ont atteint 2 fois les vitesses maximales 15-16 cm/s (0,3 noeud), la vitesse moyenne étant de 4,1 cm/s (fig. 9a). Les directions sont très variables, largement dominantes cependant vers le secteur Sud-Ouest, de 215° à 280° (fig. 9b et 10). Il n'est pas trouvé une distribution des directions en forme d'ellipse caractéristiques des courants de marée. Cette dissymétrie aboutit à une dérive résiduelle de 7 Km dans le 246°, à la vitesse moyenne non négligeable de 2,1 cm/s. La température mesurée aussi par cet appareil a varié entre 21°C et 24,3°C, ce qui permet de le "situer" au sommet de la thermocline (fig. 7),

- A 200 mètres de profondeur, les vitesses ont été égales ou inférieures à 2 cm/s dans 27 % des cas et ont atteint les vitesses maximales 15-16 cm/s dans 0,3 % des cas, la vitesse moyenne étant de 4,3 cm/s (fig. 11a). Les directions sont très variables avec deux directions dominantes, l'une vers le Nord-Est, l'autre vers le Sud-Ouest. Il est retrouvé une vague forme d'ellipse avec un axe Nord-Est/Sud-Ouest sensiblement différent de l'orientation moyenne de la côte qui est plutôt Est/Ouest. La dérive résiduelle est de 11 Km dans le 30° (à la vitesse moyenne de 0,7 cm/s), c'est-à-dire qu'il est noté une tendance de dérive vers la côte (fig. 13). La température enregistrée a varié entre 16,4°C et 22,7°C, ce qui situe l'appareil en plein thermocline, d'après la coupe de la figure 7.

Devant le manque de sensibilité et de fiabilité de l'appareil en ce qui concerne les indications de direction et de température, il n'est pas encourageant de tenter de faire de corrélation fine entre direction et vitesse de courant d'une part, et température en temps que "indicateur" d'ondes internes d'autre part.

On peut cependant signaler qu'avec une amplitude maximale de 6,3°C, entre 16,3°C et 22,6°C dans les variations de la température en pleine thermocline, l'amplitude des ondes internes peut être de l'ordre de 60 mètres d'après la figure 7a.

Il est possible de trouver le même ordre de grandeur à partir de l'une des rares fractions d'enregistrement valable de la chaîne de thermistances présentée sur la figure 14 : l'amplitude maximum des variations de température est de 5°C vers 215 mètres de profondeur en pleine thermocline, avec passage possible de 2 ondes principales en 24 heures.

Il est certain que si ce phénomène d'ondes internes et des mouvements ascendants et descendants qui y sont associés le long du talus continental revêt une réelle importance dans la compréhension de la vie du Coelacanthé, il faudrait faire appel au courantomètre à effet Doppler placé sur le fond par 200 - 250 mètres, pendant 1 ou 2 mois en été et en hiver ; cet appareil permettrait en effet de suivre en continu les mouvements des particules en suspension entre le fond et la surface, et donc les courants.

4.2.2. - Température et salinité

L'utilisation de la bathysonde pour suivre l'évolution de la température et de la salinité tout près de l'habitat du Coelacanthe a été improvisée sur place de même que son utilisation comme bathythermosalinographe accrochée au submersible lors de ses prospections.

Trois exemples d'enregistrement obtenus ainsi en point fixe sont présentés sur la figure 15. On y retrouve la marée avec des amplitudes un peu inférieures (de 20-30 cm) à celles fournies par le Service Hydrographique pour Moroni. (On note aussi la légère inégalité diurne). Les variations de température sont importantes et peuvent être brutales : l'amplitude maximum peut être égale à 5°C entre 19,4°C et 24,4°C (pf. 16) et un changement de température de 2 degrés peut s'effectuer en une heure. Il est retrouvé le même ordre de grandeur (60-80 mètres) dans les amplitudes des oscillations liées aux ondes internes, avec possibilité de 2 ondes principales par 24 heures. Ces 2 ondes principales sont vraisemblablement liées à la marée locale, mais d'autres ondes d'origines différentes semblent atteindre la zone d'étude.

On voit donc que la gamme de température dans laquelle le Coelacanthe semble aimer vivre est très large, ici trouvée entre 19°C et 24,4°C, et précédemment observée entre 17°C et 20°C (FRICKE et PLANTE, 1988).

Une autre remarque basée sur quelques observations "in situ" peut avoir de l'importance : la forme des grottes où nichent ces animaux avec un plafond en pente inversée, peut constituer une sorte de piège à eau chaude à l'occasion de ces balancements des isothermes sous l'action des ondes internes. C'est ainsi qu'a été "aspirée" par inversion des hélices de propulsion du submersible, posée à l'entrée d'une grotte, une eau "piégée" à température de 22,4°C largement supérieure à l'eau ambiante du moment (18,3°C). Il y aurait là peut-être des investigations à mener. Quant au problème de la salinité mesurée en point fixe près de cet habitat, les conclusions pouvant être tirées des enregistrements obtenus seront délicates tant que l'on ne disposera pas d'appareil avec pompe supplémentaire. En effet, au vu de ces enregistrements (fig. 15), il peut être émis l'hypothèse d'une dessalure possible, par exemple le 11 novembre vers 20 heures ($S < 35,15\text{‰}$ à 182 mètres de profondeur) dans un milieu où la salinité est voisine de 35,30‰. Mais les mêmes enregistrements montrent des salinités pouvant atteindre 35,70‰ (pf 16) en période perturbée en température (fig. 15). De même, les enregistrements de la salinité effectués lors des plongées d'exploration, dont un exemple est présenté sur la figure 16, ne montrent pas de dessalure "fiable", car toute dessalure apparente est liée à un réel réchauffement de l'eau. D'où une grande prudence en ce qui concerne l'idée émise à bord du SEA EAGLE : au vu des quantités importantes de pluies, de l'ordre de 5 à 6 mètres par an, sur les versants du Mont

KARTALA dominant la baie d'Itsoundzou, et de l'absence de rivières du fait de l'extrême porosité du sol basaltique, n'y aurait-il pas résurgences d'eau saumâtre le long des tombants jusqu'à des profondeurs de 200 mètres ? De telles résurgences ont lieu sur certaines plages près de Moroni (CORMILLOT, communication personnelle). La question posée à F. ROUGERIE, animateur du concept de l'endo-upwelling dans l'Océan Pacifique (ROUGERIE et WAUTHY, 1986) nous a valu un courrier très encourageant avec des références des plus intéressantes. En particulier, MINK (1964) et SOUZA et VOSS (1987) proposent un schéma de circulation (fig. 17) de type estuaire dans le sous-sol, avec entrée d'eau de mer profonde et sortie possible en mer d'eau plus ou moins dessalée avec comme moteur la convection thermique ou géothermique, en rapport avec le volcanisme. Il y est question du principe de GHYBEN-HERZBERG selon lequel lorsque le niveau de la nappe phréatique ("the basal water table") est à 6 mètres au-dessus du niveau de la mer, il en résulte une épaisseur possible d'eau douce de 240 mètres au-dessous du niveau de la mer à cause du rapport 40/1 entre la densité de l'eau de mer (1,025) et celle de l'eau douce (1,000).

Les forages effectués tout près de la mer dans l'île de OAHU (HAWAII) ont permis de mettre en évidence la présence d'une eau saumâtre de salinité voisine de 20‰ à 250 mètres sous le niveau de la mer.

5 - CONCLUSION

Bien qu'imparfaites, les mesures de température, de salinité et de courant au voisinage de l'habitat du Coelacanth ont apportées aux biologistes des éléments intéressants leur permettant de mieux cerner la vie de ce poisson. En particulier, sa présence dans des grottes situées à 200 mètres de profondeur où la température peut varier de 16,5°C à 22,8°C devrait être mieux expliquée.

Pour avancer dans l'analyse et la compréhension du comportement du Coelacanth, que peut souhaiter un océanographe physicien ?

- a) Améliorer la connaissance de la connexion entre ondes internes et déplacements de l'eau à l'aide d'un courantomètre à effet Doppler (ADCP) posé pendant 1 mois ou 2, aux deux saisons, chaude et froide,
- b) Tenter d'avoir une idée précise sur l'évolution de la température et de la salinité dans les grottes occupées par les coelacanthes de l'entrée jusqu'au fond,
- c) Analyser les résultats acquis en y associant un géologue spécialiste des montagnes volcaniques de la région.

BIBLIOGRAPHIE

FRICKE K. and PLANTE R., 1988 - Habitat requirements of the living Coelacanth *LATIMERIA CHALUMNAE* at Grande-Comore, Indian Ocean. *Naturwissenschaften* 75, 149-151

GOURIOU Y., MARSAC F. et PITON B., 1991 - Intrusion d'eau tropicale Sud de l'Est de Madagascar dans le Nord du canal de Mozambique sous influence Nord tropicale. *Doc. Sci. ORSTOM Brest*, n° 62

MAGNIER Y. et PITON B., 1974 - Les particularités de la couche 0-600 m dans l'Ouest de l'Océan Indien Sud Equatorial. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, XII, 3 : 143-158

MINK J.F., 1964 - Groundwater temperatures in a tropical Island Environment. *Journ. of Geophysical Research*, 69, 24 : 5225-5230

O'BRIEN J. and STRICHERZ J., 1988 et 1989 - TOGA, Wind stress analysis, Tropical Indian Ocean, 1988 and 1989. *The Florida State University, USA, éd.*

PITON B. et MAGNIER Y., 1975 - Remarques sur la circulation et les caractéristiques hydrologiques de la couche superficielle entre Madagascar et l'équateur. *Cah. ORSTOM, sér. Océanogr.*, XIII, 2 : 117-132

PITON B., 1989 - Quelques aspects nouveaux sur la circulation superficielle dans le canal de Mozambique (Océan Indien). *Doc. Sci. ORSTOM Brest*, n° 54 : 31 p

ROUGERIE F. et WAUTHY B., 1986 - Le concept d'endo-upwelling dans le fonctionnement des atolls oasis. *Oceanologica Acta*, 9,2 : 133-148

SOUZA W.R. and VOSS C.I., 1987 - Analysis of an anisotropic coastal aquifer system using variable-density flow and solute transport simulation. *Journ. of Hydrology*, 92 : 17-41

Remerciements

Monsieur RICHARD, du Ministère de la Coopération, Paris

Monsieur BOUQUET, Chef de la Mission Française d'Aide et Coopération, Moroni

Monsieur CORMILLOT, Coopération et C.N.D.R.S., Moroni

Monsieur DAMIR, Directeur du C.N.D.R.S., Moroni

Madame DACQUIN, M.A.C., Moroni

Docteur ROSSI, Hôpital, Moroni

Le commandant du SEA EAGLE et son équipage

Le Professeur H. FRICKE et son équipe

Daniel CORRE de l'atelier informatique du centre ORSTOM de Brest

Jean-Michel BORE, ORSTOM Brest, pour les dessins .

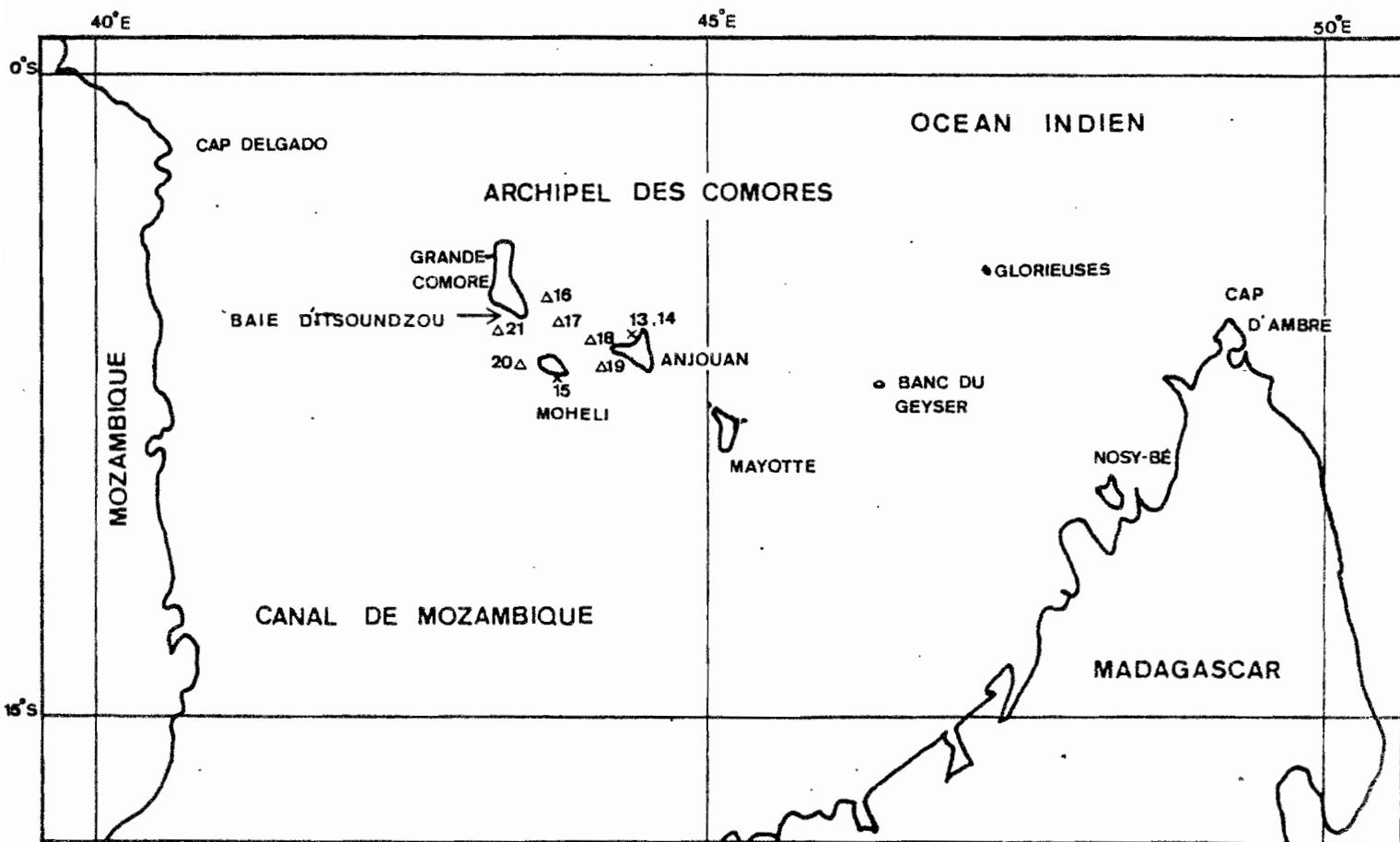


Figure 1 : L'Archipel des Comores dans le Nord du canal de Mozambique (Océan Indien) :
 Δ : position des profils CTD effectués au large à l'aide de la bathysonde SEA BIRD SBE 19 (stations 16 à 21),
 x : position des observations en point fixe à Anjouan et à Mohéli.

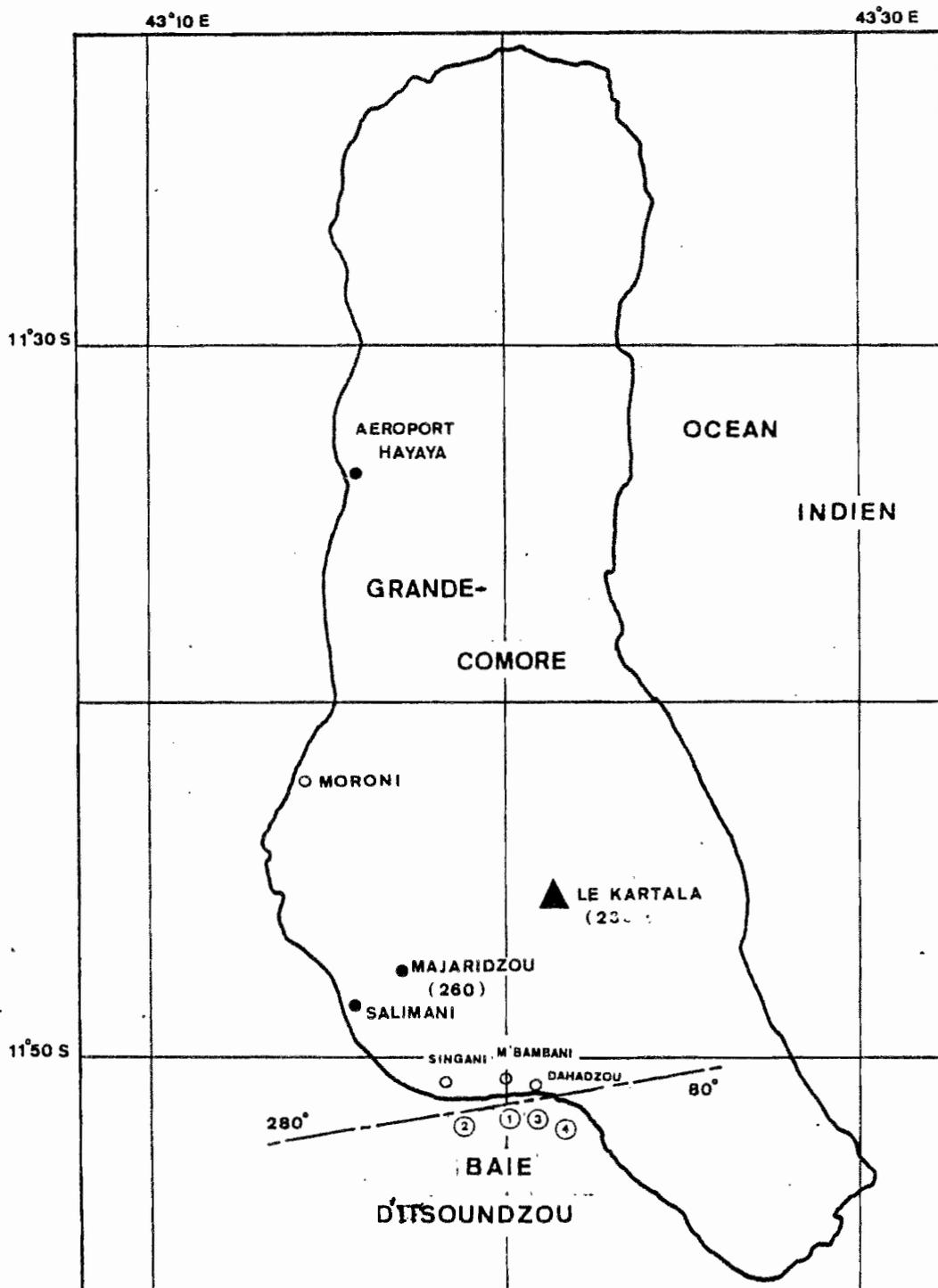


Figure 2: Les principaux sites d'observation sur la Grande-Comore et en baie d'Itsoundzou dans le Sud de l'île :

● : Position des stations d'observations pluviométriques,

(1) : position approximative du site principal d'observations (profils CTD Sb 1,3 - points fixes pf 1, 2, 6, 7 et 16) et du mouillage du courantomètre et de la chaîne à thermistances AANDERAA,

(2) : autre site (Sb 2 + pf 3, 4, 5),

(3) idem (Sb 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 + pf 8, 9, 10, 11),

(4) idem (Sb 12, 13, 14, 15 + pf 12, 17).

280°-80° : Orientation moyenne de la côte devant le site d'observation n° 1.

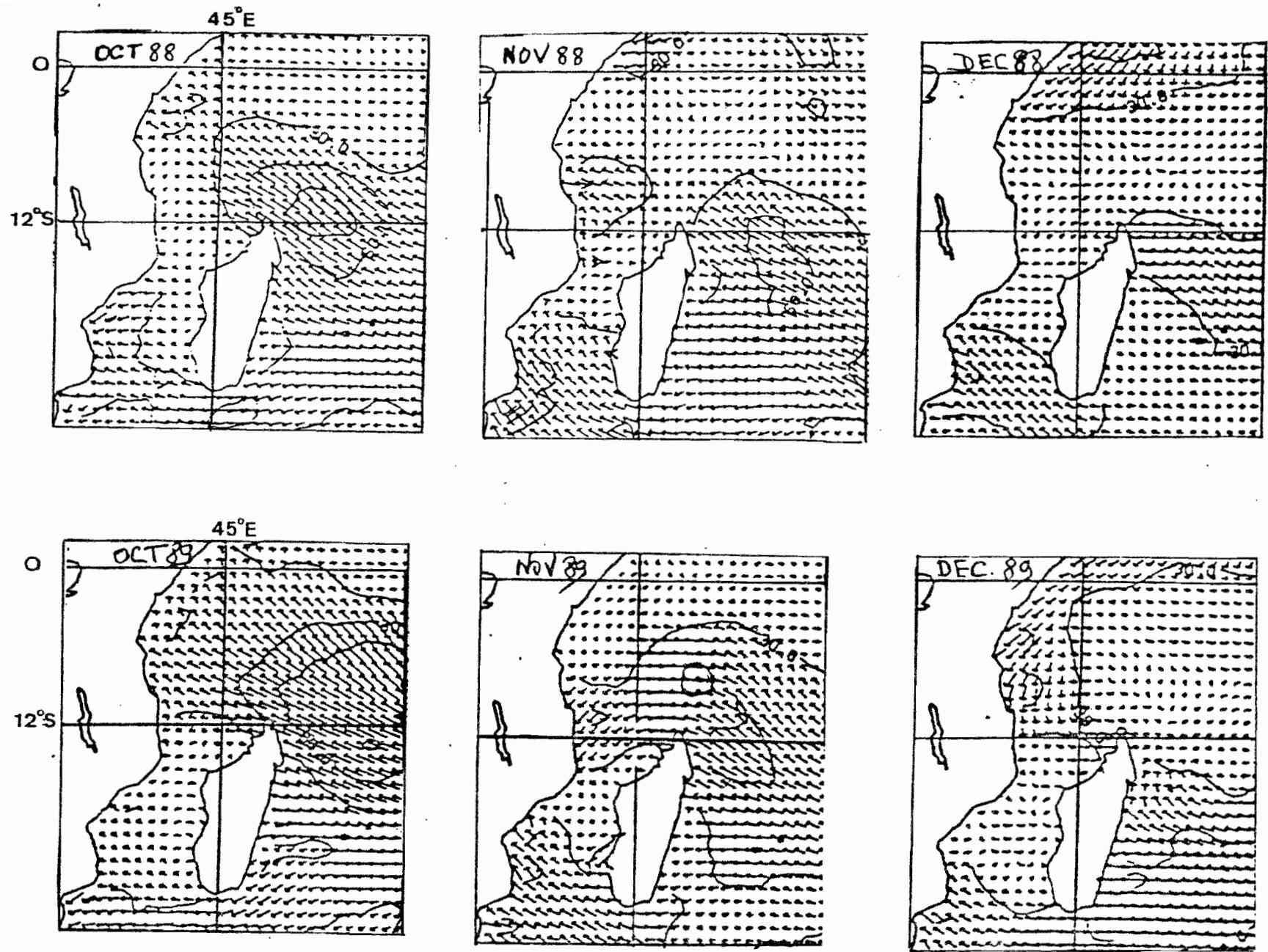


Figure 3 : Pseudo-tensions de vent (m^2/s^2) sur le Sud-Ouest de l'Océan Indien en octobre, novembre et décembre 1988 et 1989, d'après O'BRIEN et STRICHERZ, (1988 et 1989).

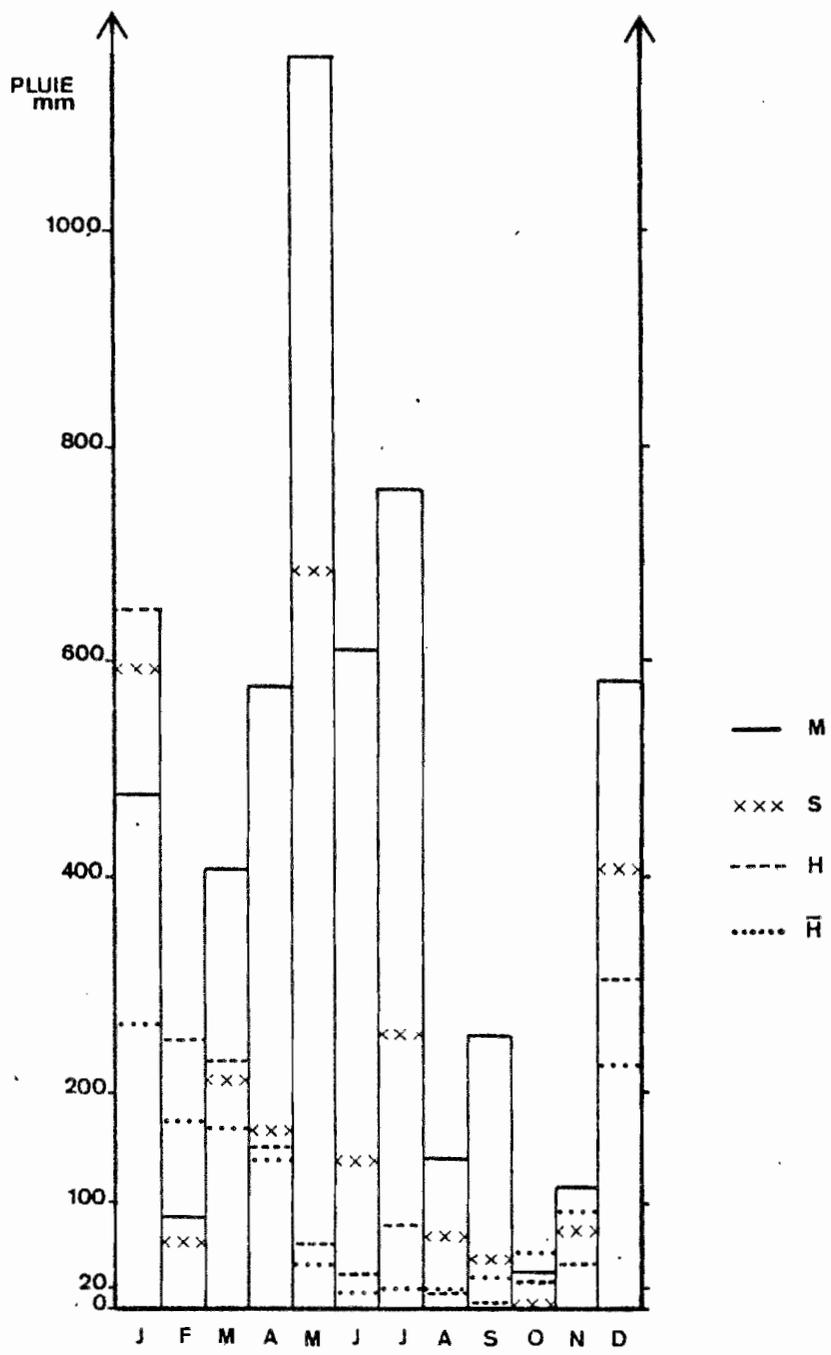


Figure 4 : Quantités mensuelles de pluie mesurées en 1989 aux stations météorologiques de Majaridzou (M, altitude 260 mètres) et de Salimani (S, altitude 10 mètres) de la Météorologie Nationale Comorienne, ainsi qu'à la station ASECNA de l'aéroport de Hayaya (H, altitude 10 mètres).

H̄ : moyennes mensuelles de pluie à Hayaya.

40° E

45° E

50° E

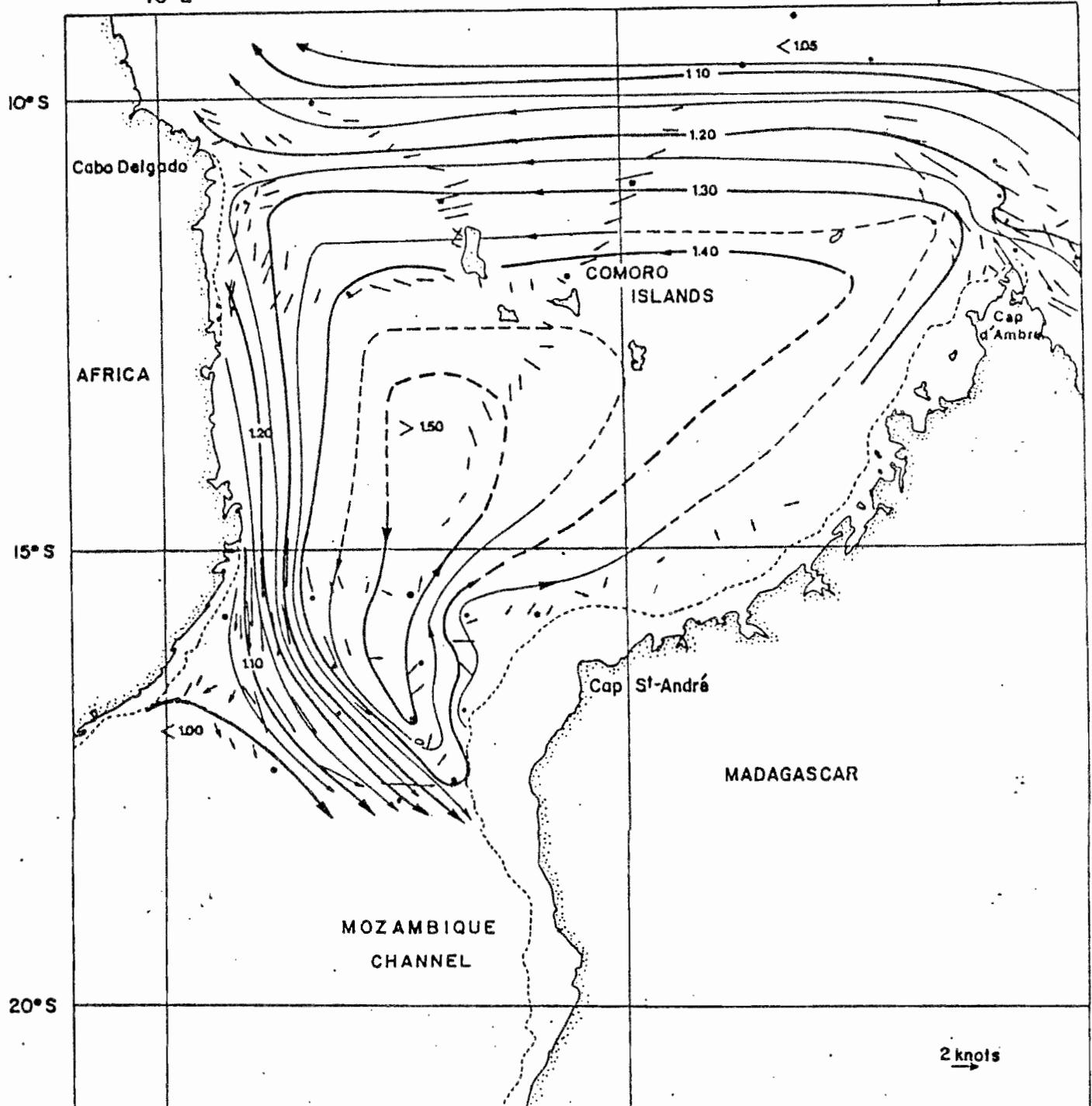


Figure 5 : Courants de surface déduits des anomalies de hauteurs dynamiques de la surface par rapport à 500 décibars et des mesures directes par le courantomètre à électrodes remorquées G.E.K., d'après les résultats de la campagne "MOZAMBIQUE" (22 février-28 mars 1974) du N.O. VAUBAN (d'après PITON, 1989).

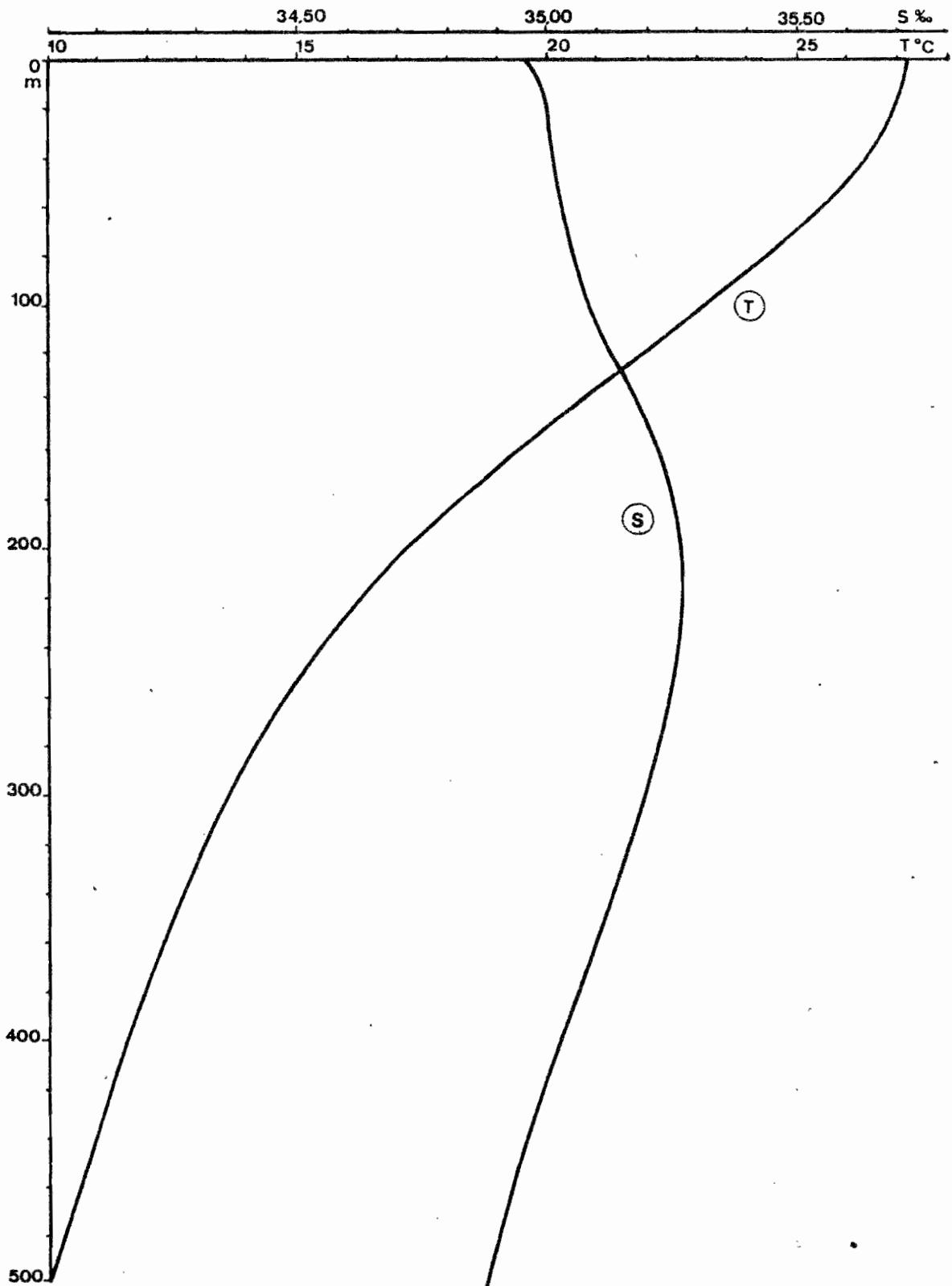


Figure 6 : Profils verticaux moyens de la température et de la salinité dans les parages de l'archipel des Comores, d'après le fichier LEVITUS (climatologie).

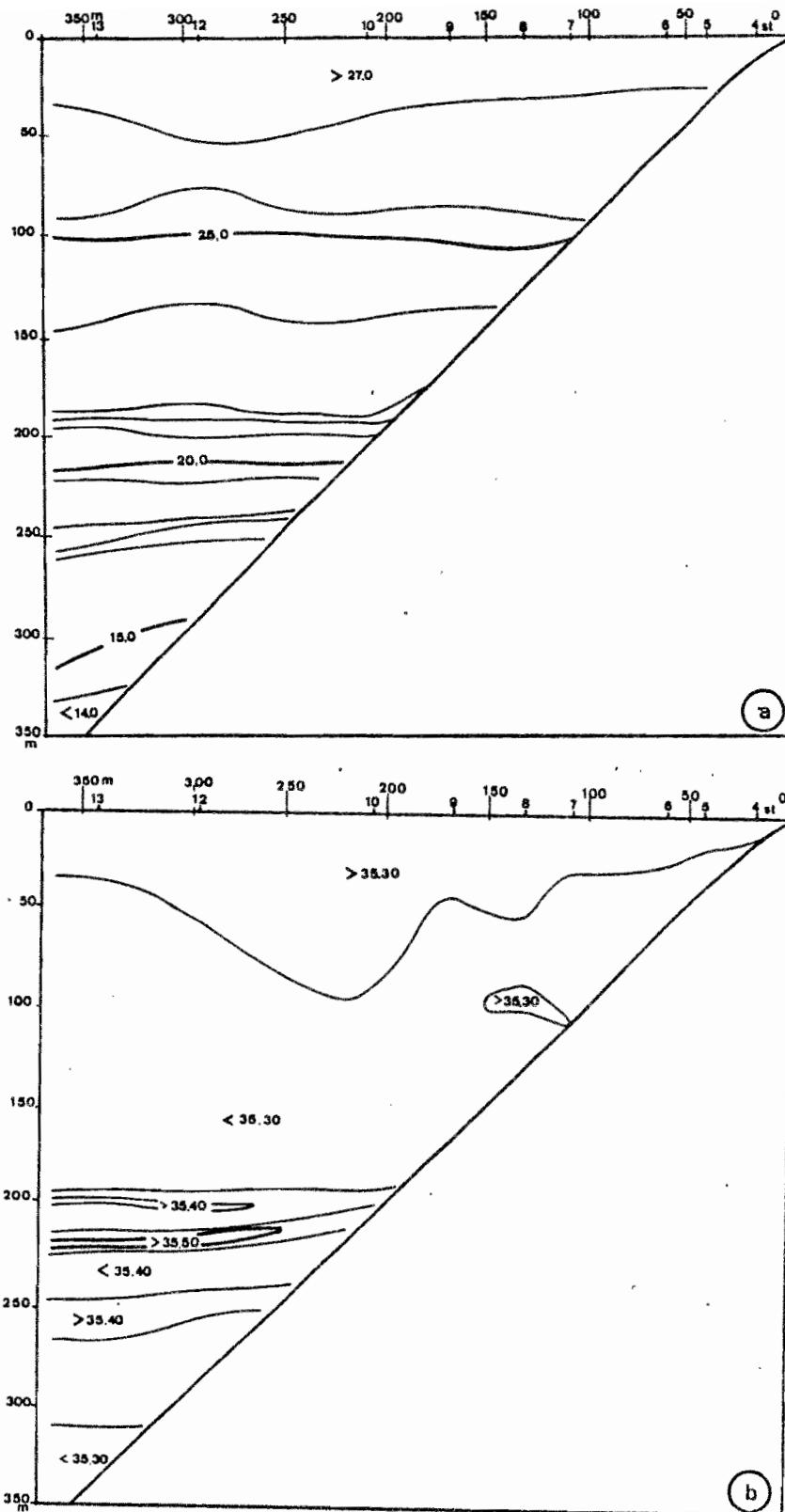


Figure 7 : Répartition verticale de la température (a) et de la salinité (b) le long d'une radiale perpendiculaire à la côte en baie d'Itsoundzou, effectuée le 24 novembre 1989 (sur le site 3).

Particularité : L'échelle des distances entre station est la même que l'échelle des profondeurs.

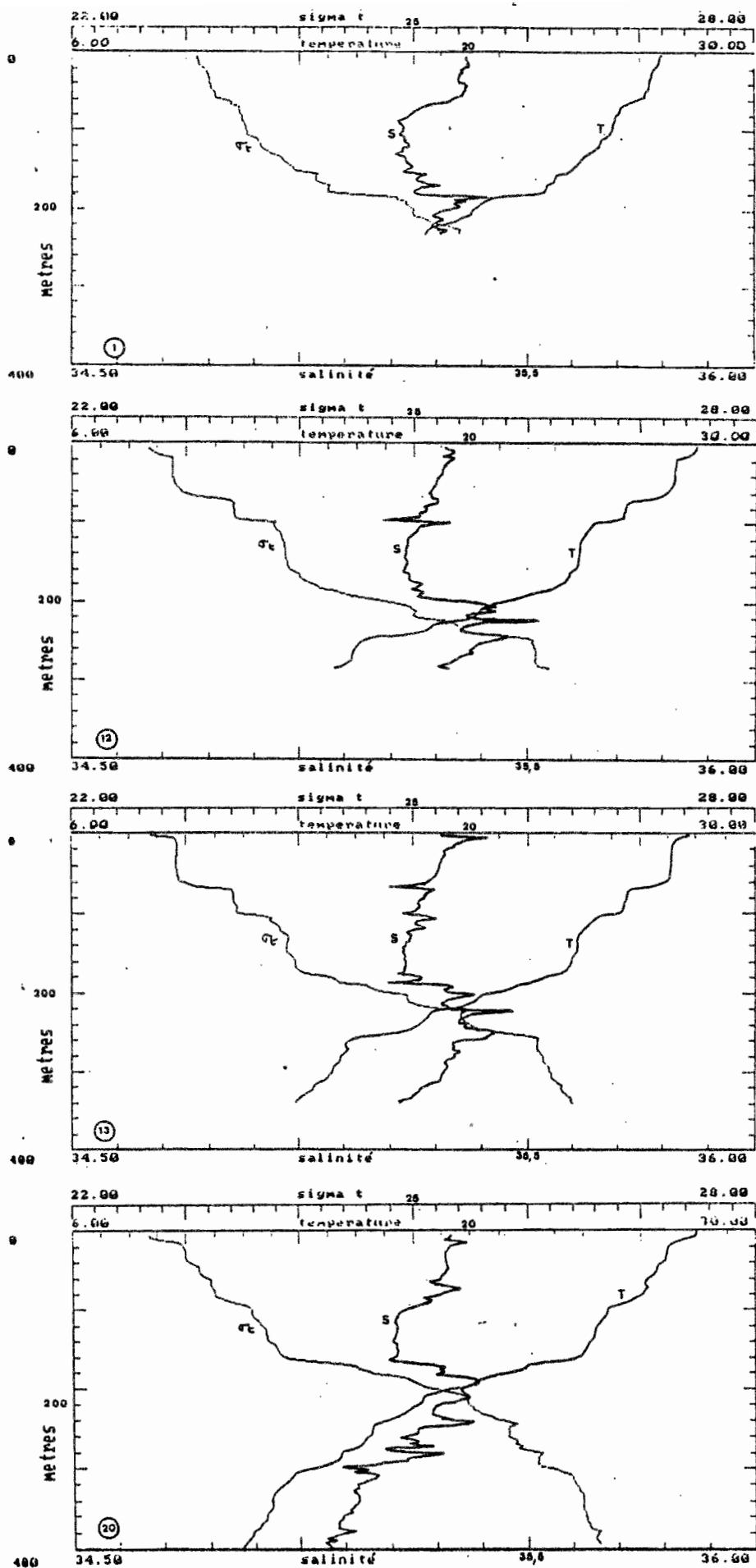


Figure 8 : Quelques profils verticaux de la surface jusqu'à 400 mètres de profondeur au maximum de la température (T), de la salinité (S) et de la densité (σ_t) (moyenne tous les 3 mètres). Stations 1, 12, 13 et 20 (pour les positions, voir fig. 1 et 2 et les tableaux).

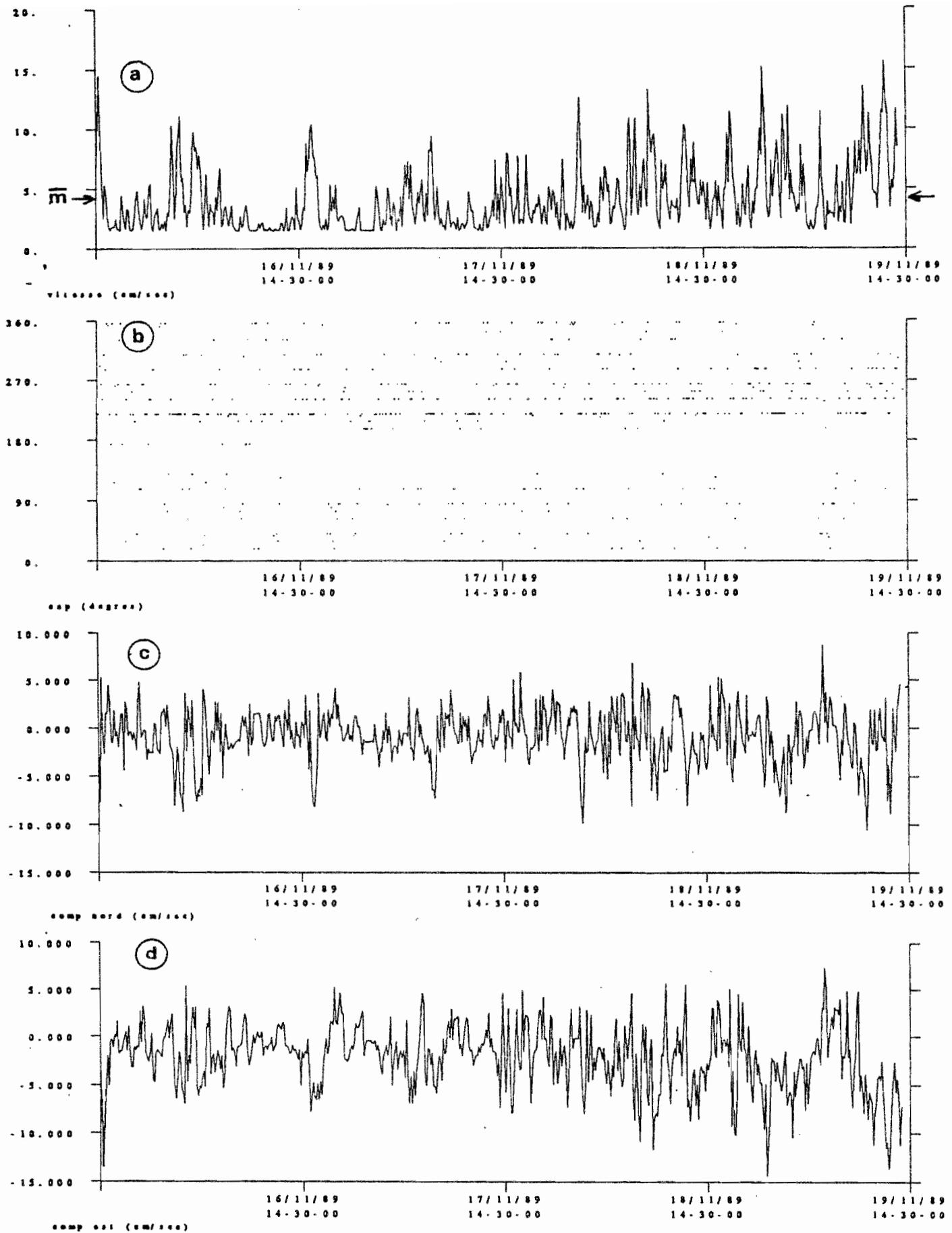


Figure 9 : Courantométrie AANDERAA, immersion moyenne : - 158 mètres (15-19 novembre 1989) : évolution en fonction du temps de la vitesse en cm/s (a), de la direction (b) et des composantes Nord-Sud (c) et Est-Ouest (d) du courant
 \bar{m} : vitesse moyenne 4,1 cm/s.

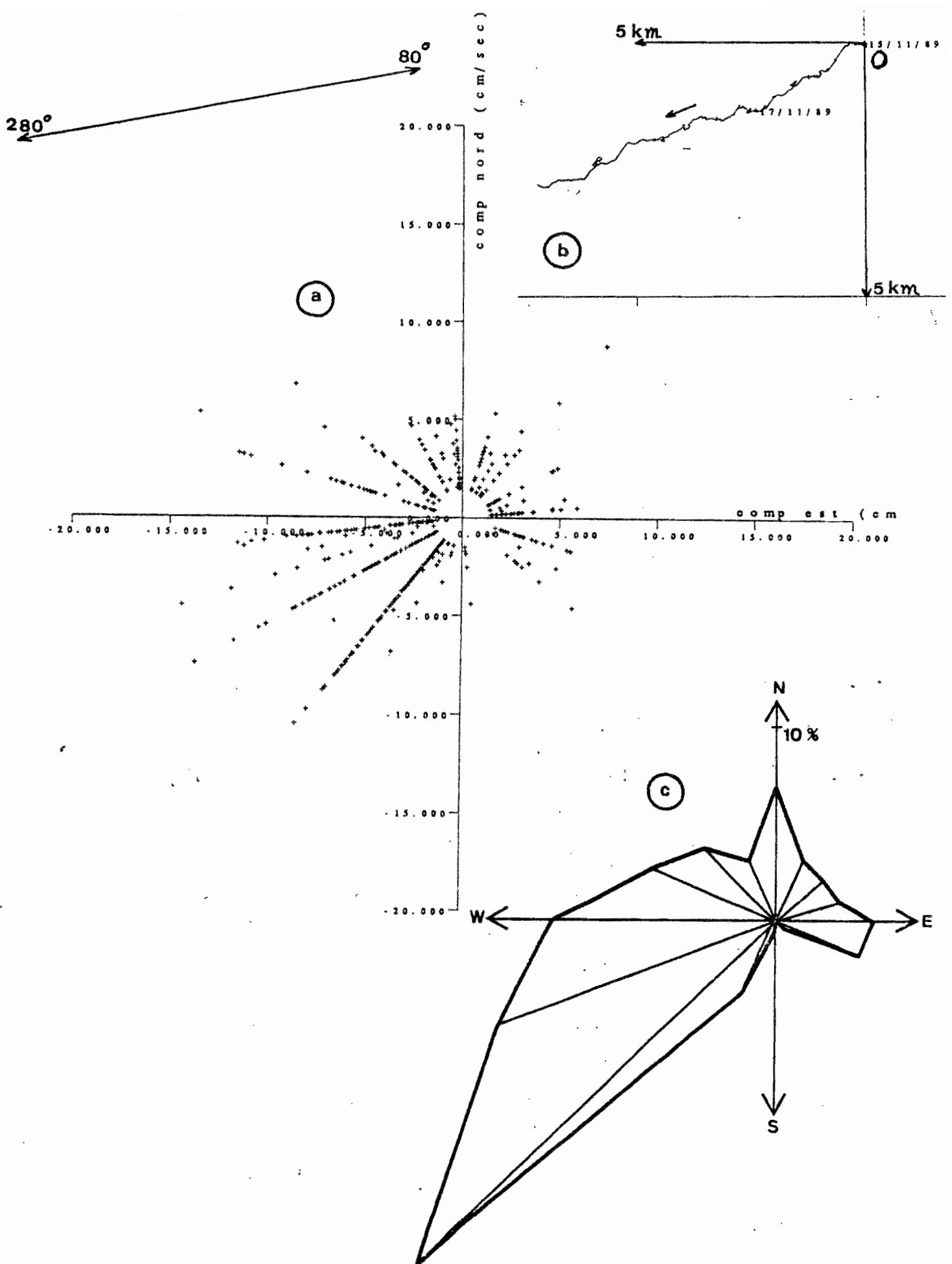


Figure 10 : Courantométrie AANDERAA, immersion - 158 mètres :

(a) hodographe et (b) hodographe intégré du vecteur courant par rapport à l'orientation de la côte 80°/280°,

(c) fréquence des directions où porte le courant (rose de 16 secteurs de 22,5 degrés).

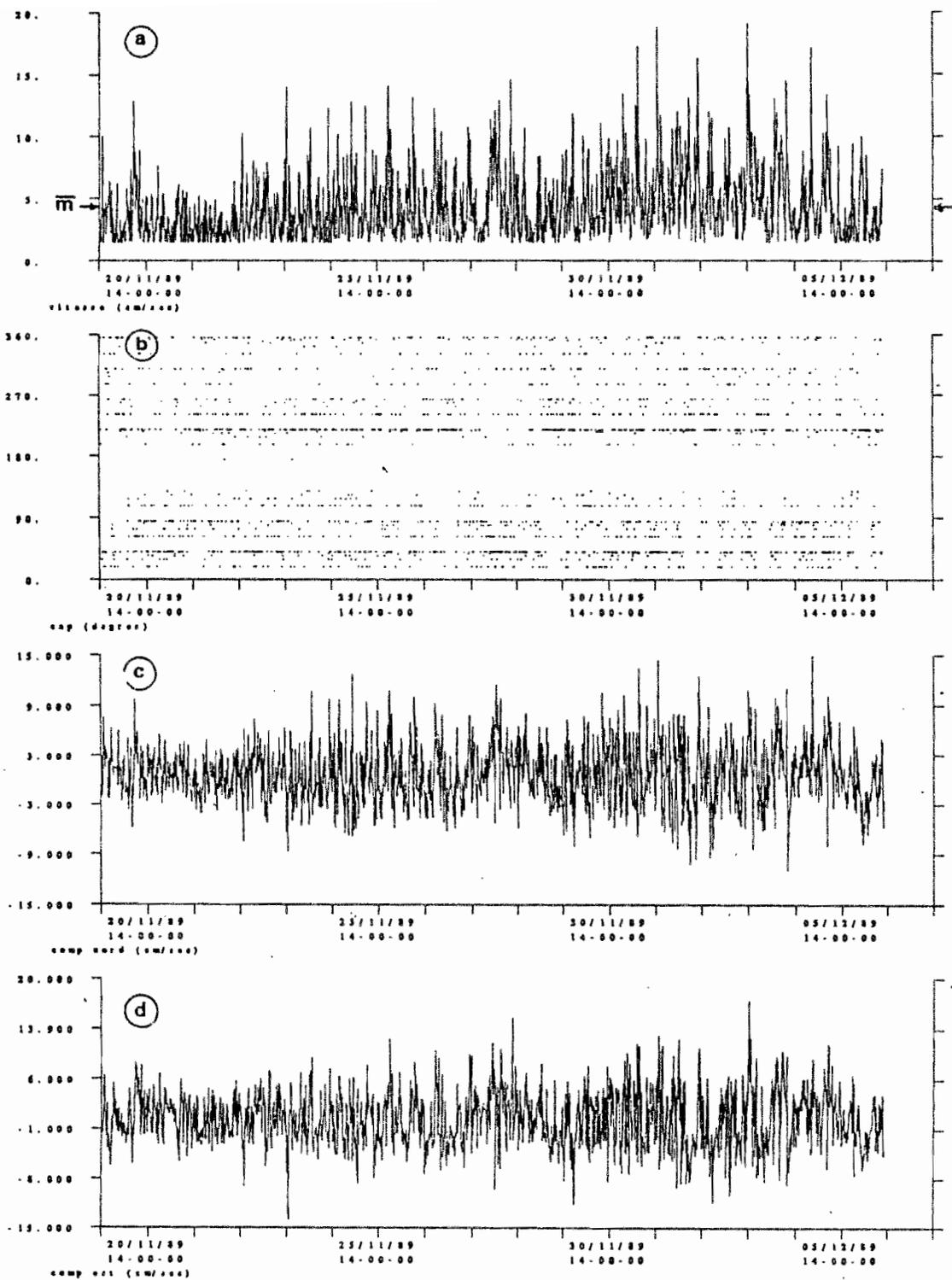


Figure 11 : Courantométrie AANDERAA, immersion moyenne : - 200 mètres (19 novembre-6 décembre 1989) : évolution en fonction du temps de la vitesse en cm/s (a), de la direction (b) et des composantes Nord-Sud (c) et Est-Ouest (d) du courant.
 \bar{m} = vitesse moyenne 4,3 cm/s.

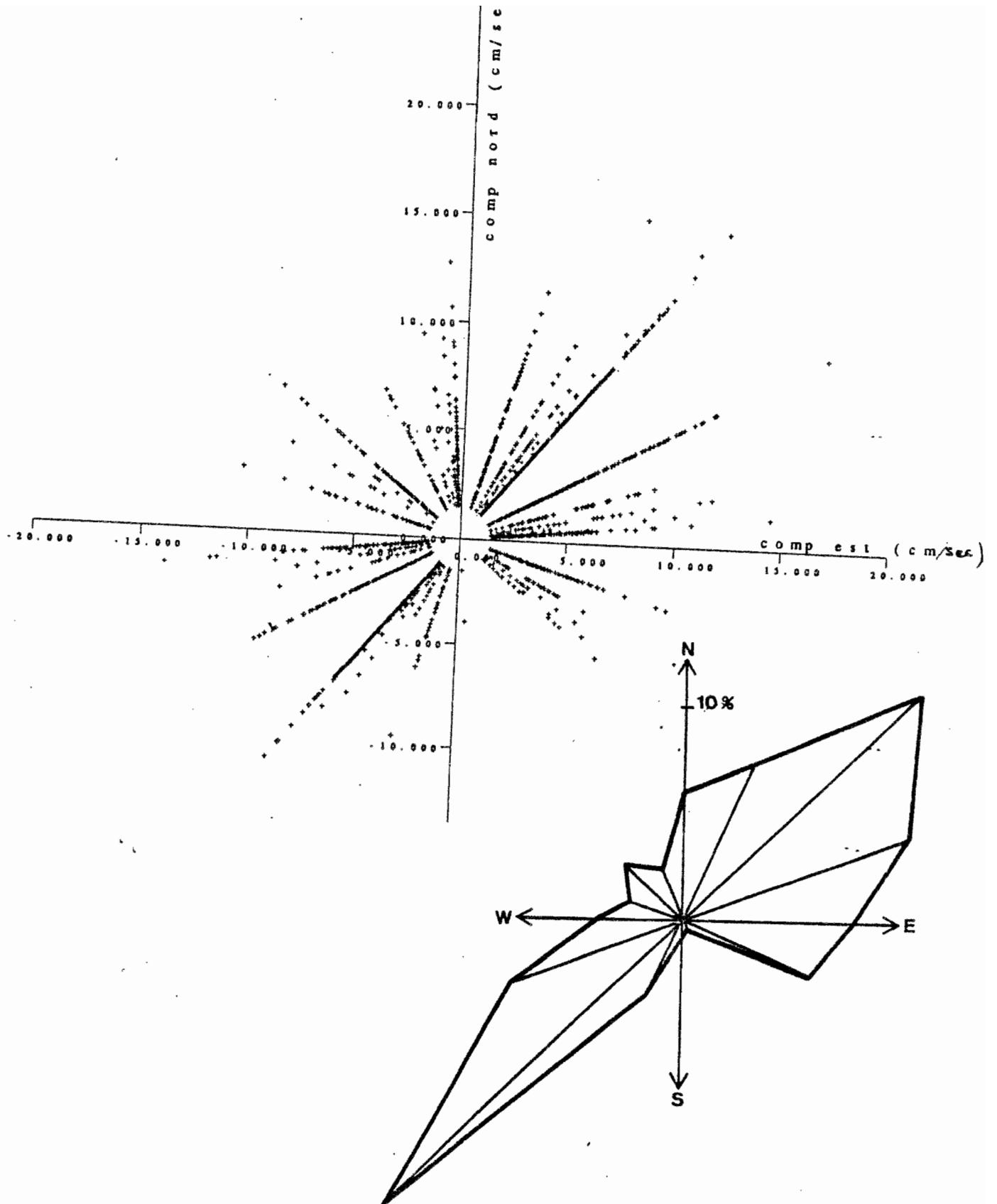


Figure 12 : Courantométrie AANDERAA, immersion - 200 mètres :
 (a) Hodographe,
 (b) Fréquence des directions où porte le courant.

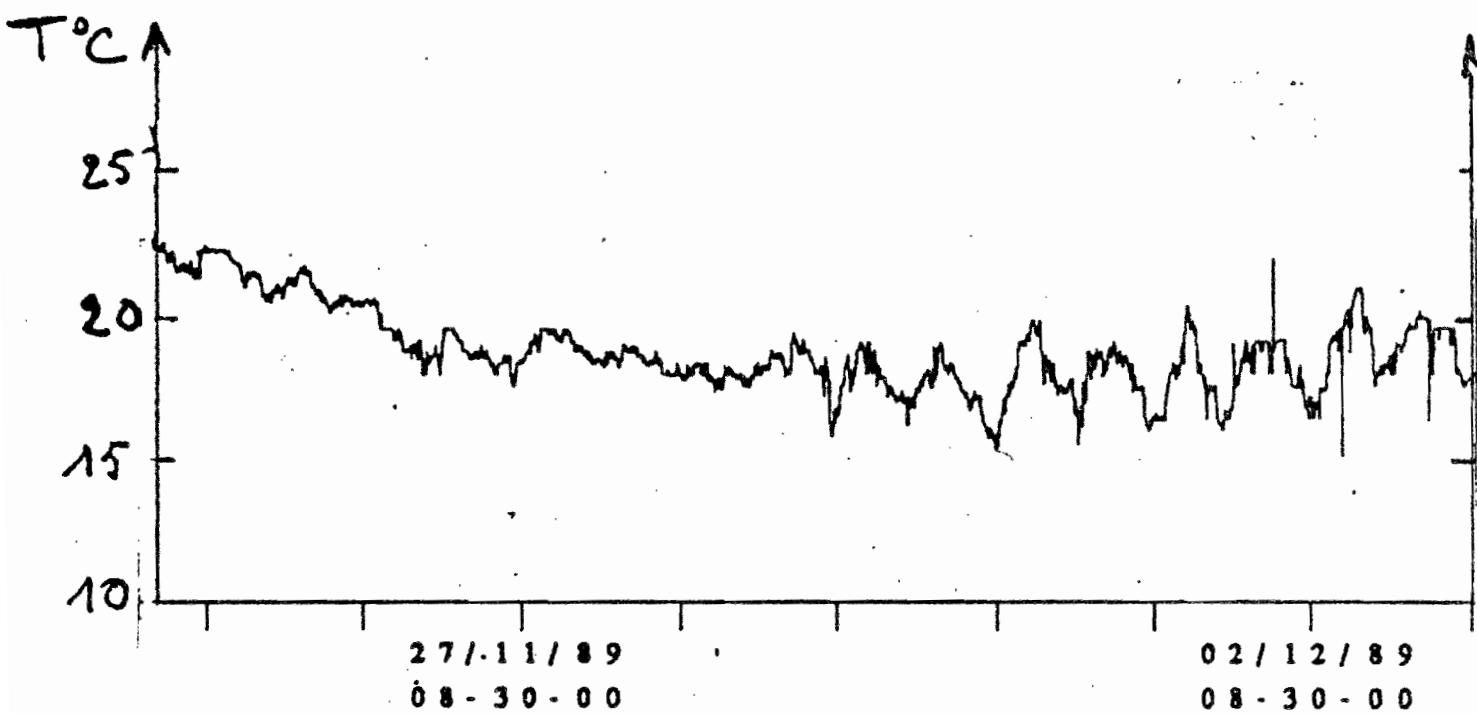


Figure 14 : Un exemple d'enregistrement de la température en continu (pas de 5 minutes) à l'aide d'une chaîne de thermistances AANDERAA posée sur le fond (capteur situé vers 215 mètres de profondeur).

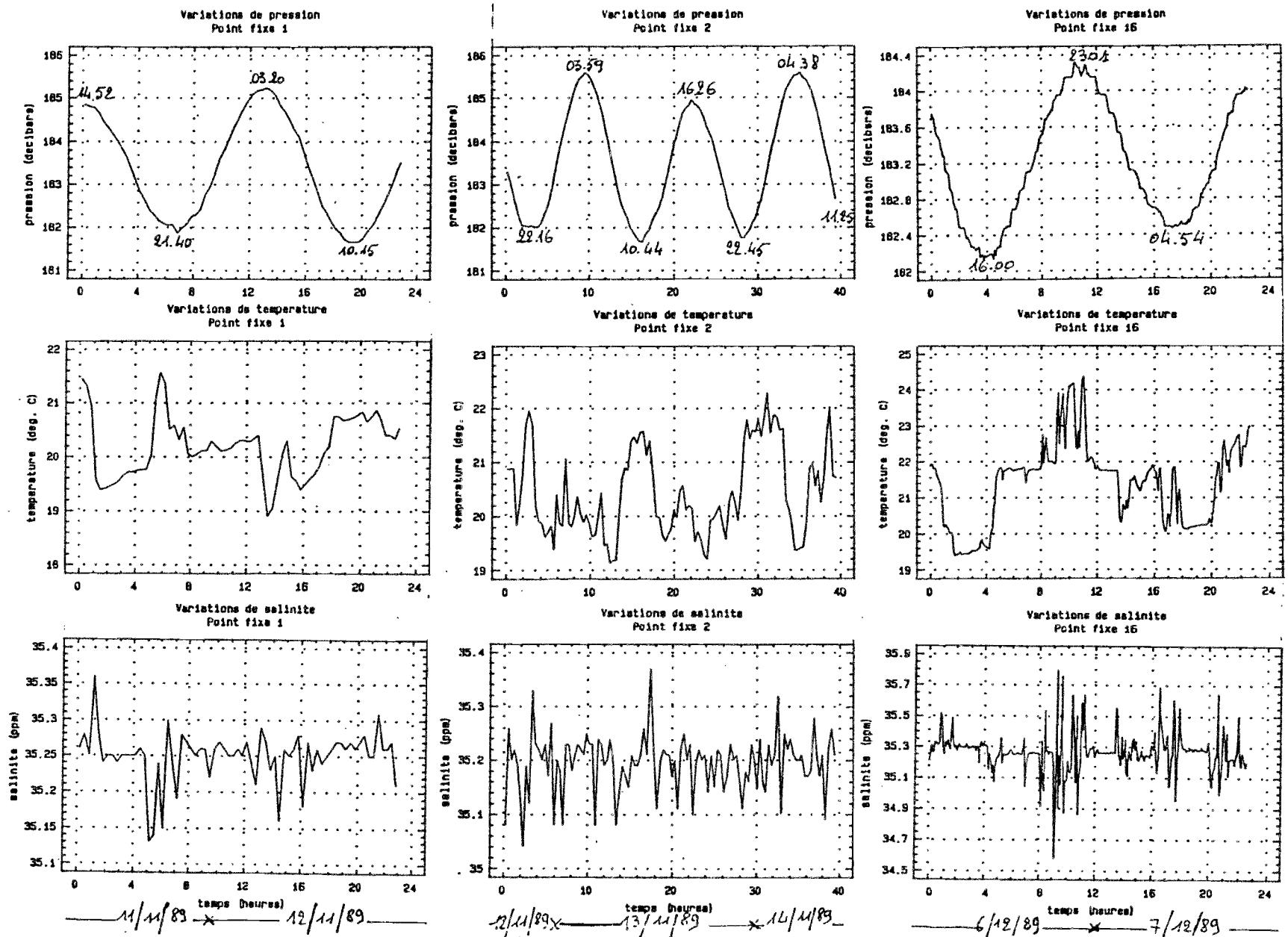


Figure 15 : Enregistrements par bathysonde SEA BIRD SBE 19, posée sur le fond près d'une même grotte à coelacanthes, de la pression (marée), de la température et de la salinité à 3 périodes différentes. Les chiffres inscrits près des courbes de pression indiquent l'heure des pleines et basses mers en temps local (TU + 3).

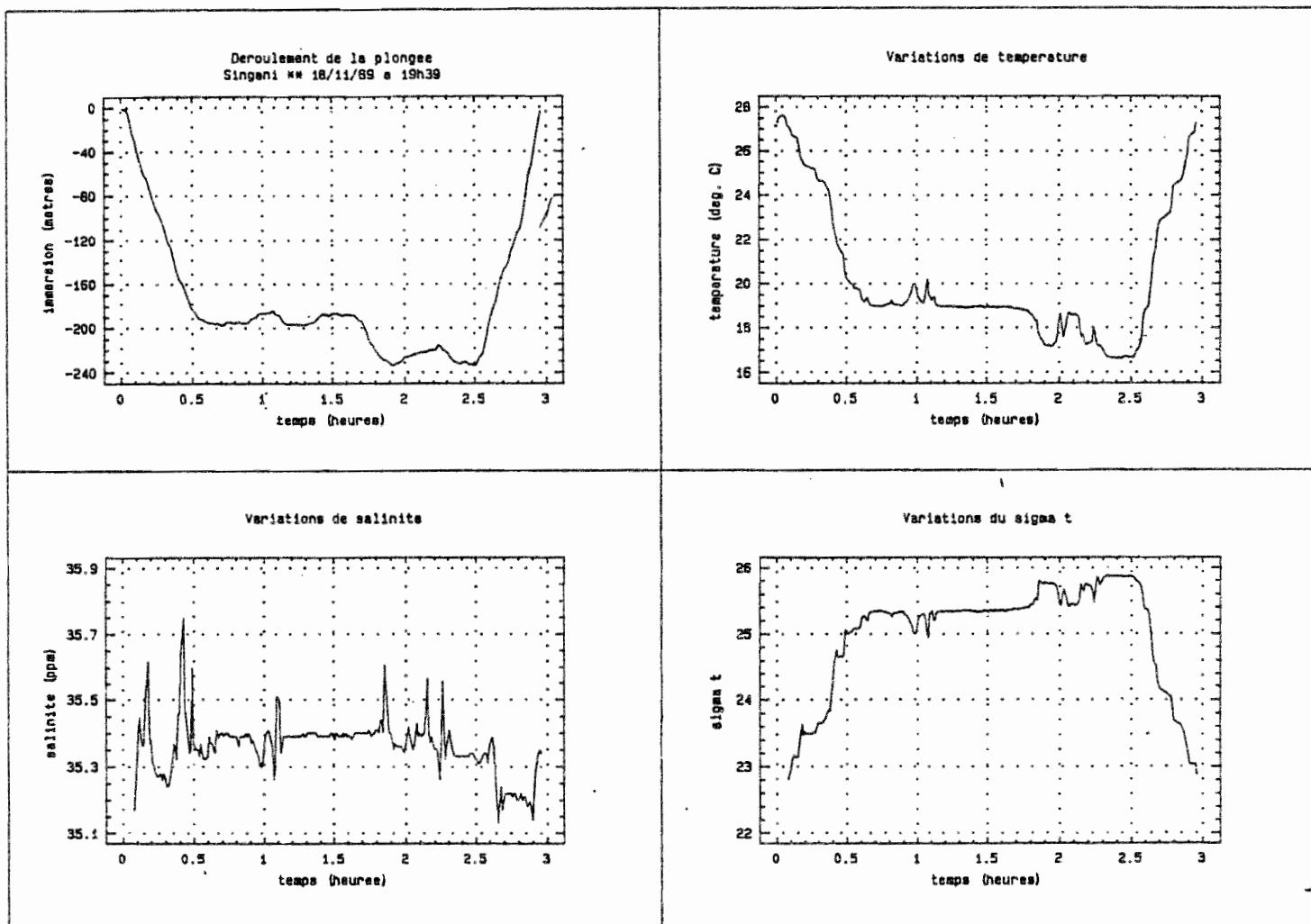


Figure 16 : Un exemple d'enregistrements de mesures de la profondeur, de la température, de la salinité et de la densité effectuées à partir de la bathysonde SEA BIRD fonctionnant comme bathythermosalinographe sur le submersible lors d'une plongée d'exploration le long du tombant insulaire.

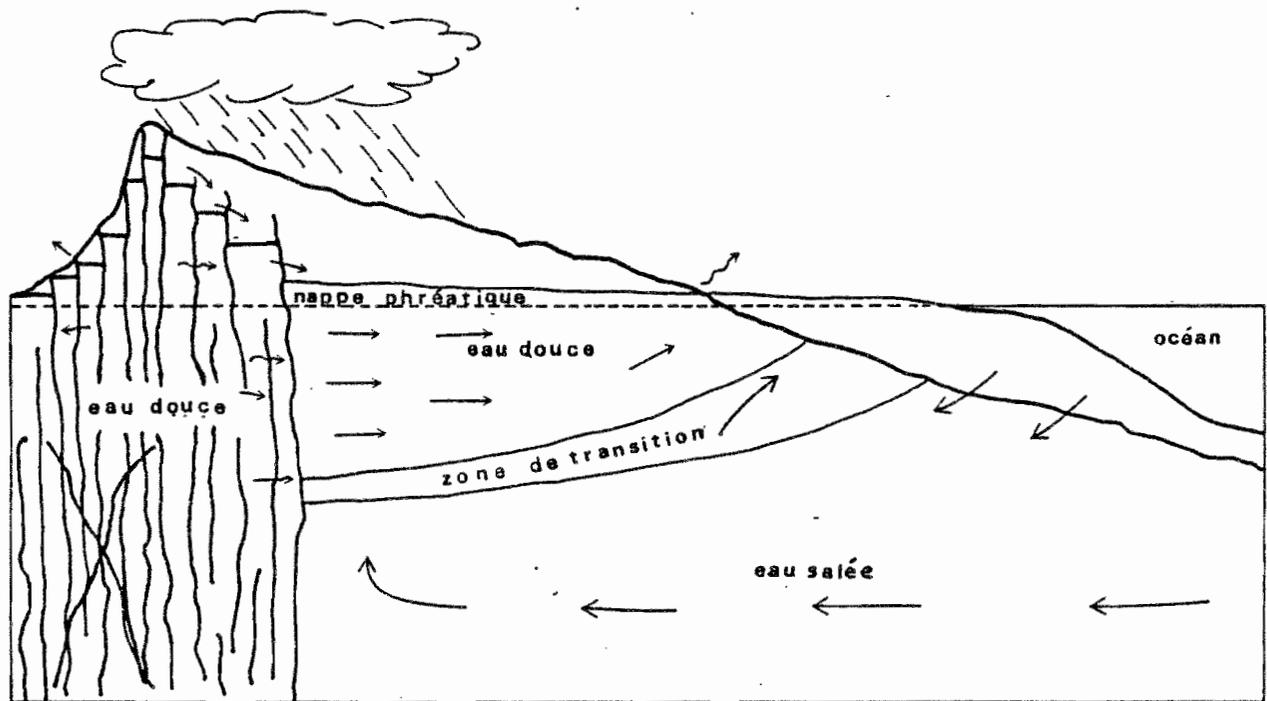


Figure 17 : Section schématisée d'une île basaltique de l'archipel de HAWAII (OAHU) montrant la circulation de l'eau souterraine et les relations possibles entre l'eau de mer et l'eau de pluie à travers le sol poreux et sous l'action de la convection géothermique (d'après SOUZA et VOSS, 1987).