

EXPEDITION OcéANOGRAPHIQUE "CAPRICORN"

de la

"SCRIPPS INSTITUTION OF OcéANOGRAPHY" DE L'UNIVERSITÉ DE CALIFORNIE

Novembre 1952 - Février 1953

par Henri ROTSCHI, Océanographe à l'Institut français d'Océanie

Le présent rapport a été écrit à la suite de l'expédition océanographique "Capricorn", de la Scripps Institution of Oceanography de l'Université de Californie, à laquelle le Dr. R.R. REVELLE, Directeur de l'Institut et chef de l'expédition m'invita à participer à titre de géochimiste et de chimiste.

Je l'ai rédigé en m'aidant largement du livre de bord de l'expédition, à la composition duquel prirent part MM. R.R. REVELLE, Professeur d'Océanographie à la Scripps Institution, R. FAIRBRIDGE de l'Université de Western Australia, Géologue et spécialiste des récifs, H.W. MENARD, Géologue à l'U.S. Navy Electronics Laboratory W.H. MUNK et R.W. RAITT, Professeurs de Géophysique à la Scripps Institution, des notes nombreuses que je pris au cours de l'expédition et des discussions fertiles que j'eus avec les personnes citées ainsi qu'avec G. ARRHENIUS, Géologue suédois, T.R. FOLSOM, J.D. ISAACS et A.E. MAXWELL, entre autres. Je me suis servi également des résultats des travaux que j'ai faits durant l'expédition, puisque j'avais la charge des études entreprises sur la chimie des échantillons d'eau de mer collectés par le "BAIRD", sur la teneur des eaux superficielles et profondes en matières en suspension, sur la teneur en pigments des eaux superficielles, et que j'ai exécuté avec le Dr. ARRHENIUS les recherches sur la chimie des sédiments faites à bord. Il est donc évident qu'un tel rapport est oeuvre collective, où chacun apporta la part que sa spécialité lui permettait de mettre, et que c'est le Dr. REVELLE qui a fourni toutes les principales idées directrices dans la discussion des sujets présentés ici.

Ce travail n'a été rendu possible que par le désir maintes fois exprimé et enfin réalisé de nos collègues américains de permettre aux chercheurs d'autres nationalités de bénéficier des facilités dont ils jouissent eux-mêmes pour le travail en mer. C'est la ténacité déployée par le Dr. R.R. REVELLE pour arriver à associer à son équipe d'autres chercheurs étrangers qui a réussi à aplanir les difficultés d'ordres administratif et militaire

C. R. S. I. O. M.

Collection de Référence

n° 11961

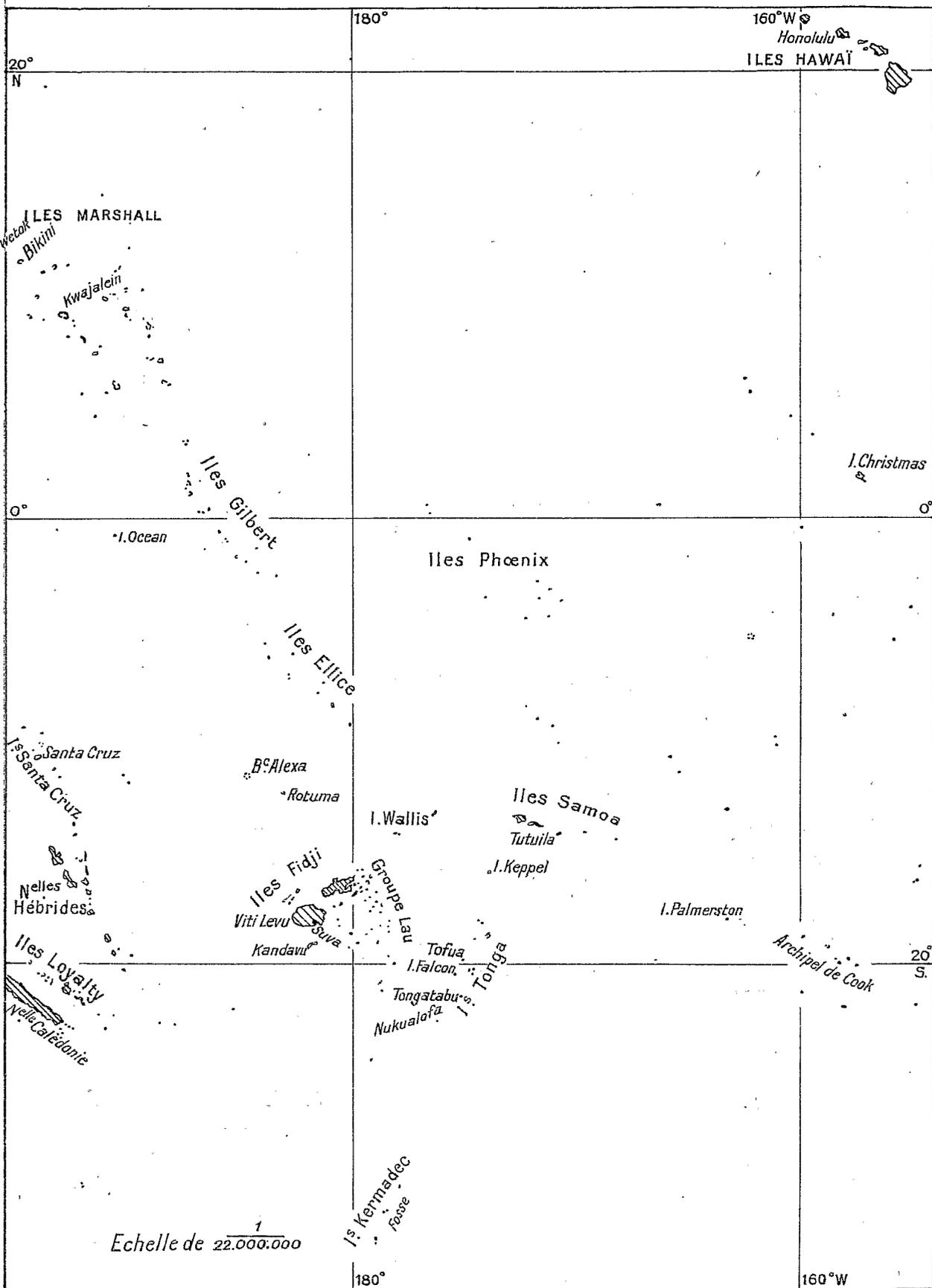
soulevées par le fait que l'U.S. Navy supportait la plus grande partie des frais de l'opération. Je tiens donc à remercier chaleureusement le Dr. R.R. REVELLE d'avoir rendu possible ma participation à ces études, ainsi que pour l'accueil que lui et ses collaborateurs ont bien voulu me réserver au cours de mon séjour parmi eux. J'ose espérer, comme il en est fait état dans le journal de bord "que dans les futures expéditions les facilités de travail en mer pourront de nouveau être partagées avec des chercheurs qualifiés d'autres pays", puisque cela s'est révélé pour moi si fertile en expériences acquises et en connaissances développées.

INTRODUCTION

L'expédition "Capricorn" fut la quatrième d'une série d'expéditions dont le but est l'exploration pratiquement complète de tout le Pacifique aux points de vue surtout géologique et hydrographique. Elle fut précédée par les expéditions "Mid-Pacific", "Northern Holiday", et "Shellback" et elle est actuellement suivie par l'expédition "Trans-Pacific". Elle fut la première à consacrer la plus grande part de son temps à l'exploration de la partie méridionale de l'Océan Pacifique, entre l'Equateur et le Tropique du Cancer.

Comme l'ont été les expéditions précédentes et comme le seront les expéditions futures, elle fut financée principalement par l'Université de Californie, le "Bureau of Ships of the Navy Department" et l'"Office of Naval Research". La partie météorologique du programme était supportée par l'"Air Force Cambridge Research Center".

Elle fut axée sur l'étude des différents aspects de la sédimentation dans le bassin central de l'Océan Pacifique; l'on utilisa pour ces recherches des méthodes sismiques, le sondage par l'ultra-son, les carottages, l'étude du champ magnétique terrestre à la surface de la mer et de ses variations avec la topographie sous-marine, la mesure du gradient de température dans les couches superficielles du sédiment et la photographie sous-marine; au point de vue chimique l'on étudia à bord les principales caractéristiques instables du sédiment: teneur en eau, potentiel d'oxydo-réduction, ainsi que certaines propriétés telles que la teneur en silicate. La sédimentation étant partiellement fonction de la productivité de la mer, de sa population planctonique et de ses mouvements, il apparut nécessaire d'inclure dans le programme l'étude de ces facteurs. Des recherches sur la circulation générale des masses d'air dans les tropiques furent aussi poursuivies en relation avec l'action des couches atmosphériques sur la circulation océanique.



H. Rotschi

Planche I

ITINERAIRE

L'expédition était composée de deux navires, R/V HORIZON et R/V SPENCER F. BAIRD, mais il sera surtout insisté sur le travail du second, à bord duquel se trouvait H. ROTHSCHI.

L'"HORIZON" quitte Kwajalein le 26 novembre en direction du Sud, faisant des stations hydrographiques et prenant plusieurs carottes-échantillons du fond. Le 29 novembre, il fait escale à l'île Océan où une section de géologues débarque pour faire quelques observations et étudier les mines de phosphates pendant que quelques plongeurs au scaphandre Cousteau-Gagnan plongent dans le récif, prélèvent des échantillons de corail et étudient les passes dans le côté au vent, et que les géophysiciens mesurent les variations diurnes du champ magnétique terrestre, à l'endroit même où la "Carnegie Institution" fit une station en 1915, et déterminent le gradient vertical du potentiel électrique de l'atmosphère. Pendant ce temps, le navire sonde durant deux jours à l'écho-sondeur les environs de l'île et fait route ensuite vers le Nord pour retrouver à la hauteur de l'équateur, le "BAIRD", qui a quitté Kwajalein le 28, et procéder le 2 décembre à la première station sismique au cours de laquelle, tandis que le "BAIRD" est à l'écoute en station, l'"HORIZON" part d'un point distant de cinquante milles et fait route vers celui-ci jetant à l'eau tous les quatre milles au début, puis tous les milles lorsqu'il s'approche, des charges de dynamite explosant à environ cinquante mètres de profondeur, pesant au début quatre-vingt livres et dont la masse est diminuée de 1/2 livre chaque mille, à mesure que la distance décroît. Cette opération se poursuit pendant que l'"HORIZON" parcourt en ligne droite 100 milles et que le "BAIRD", en station, procède à des prélèvements de carottes sédimentaires, d'échantillons d'eau, mesure le gradient de température du sédiment.

Après cette opération, les deux navires font route vers le Sud au-dessus d'un fond qui s'élève et s'abaisse ensuite, effectuant des mesures de courant au G.E.K. (geomagnetic electrokinetograph), prélevant des échantillons d'eau et des carottes à l'aide du carottier à piston. Beaucoup de ces longues carottes sont faites de sédiment tertiaire recouvert par une petite couche de sédiment récent mélangé à du tertiaire.

Le 6 décembre a lieu la deuxième station sismique à l'ouest des îles Ellice.

Puis le "BAIRD" fait route vers le Sud et l'"HORIZON" vers le Sud-Est dans le but d'explorer l'escarpement qui doit probablement s'étendre des îles Santa-Cruz vers l'Ouest à la proximité des îles Wallis à l'Est. Cet escarpement et la dépression qui

est au Sud sont parmi les traits les plus importants de la ligne andésite qui marque la frontière entre la région située à l'Ouest, dont les roches de type acide sont du caractère continental, et le bassin océanique de l'Est où les roches sous-jacentes sont d'un type plus basique. Le "BAIRD" trouve cet escarpement au Nord-ouest du Banc Alexa et l'explore ainsi que le bassin les 7, 8, 9 décembre. L'"HORIZON" ne le trouve que dans la proximité immédiate de Rotuma.

Le 8 décembre a lieu la troisième station sismique à l'emplacement du banc Alexa pour étudier la structure de cet atoll mort dont le sommet repose par 40 mètres de fond. Les études sismiques indiquent une épaisseur de calcaire de plusieurs milliers de pieds, du même ordre de grandeur qu'à Bikini ou Eniwetok. On drague également le talus nord de cet atoll et l'on plonge pour prendre une série de photographies du plateau le couronnant et collecter quelques échantillons du corail qui le compose.

Les deux navires font ensuite route vers le Sud, procèdent à la quatrième station sismique et, se dirigeant ensuite toujours vers le Sud, atteignent le 12 décembre Suva où ils font escale.

L'"HORIZON" quitte Suva le 15 pour faire des sondages au Sud-ouest de Viti Levu. Le "BAIRD" quitte le 17 et les deux navires se rencontrent le 18 pour la cinquième station sismique au-dessus de la dépression de Kandavu à 60 milles au Sud de Suva. Une carotte de sable volcanique de trois mètres de long est collectée.

Le 20 décembre, sixième station sismique dans le bassin de Fidji qui est une large dépression très à l'intérieur du côté continental de la ligne andésite. Le gradient de température mesuré là est extrêmement élevé de 0,15 degré par mètre. Le seuil de ce bassin est à trois mille mètres de profondeur alors que son point le plus profond est à 4 500 mètres. Une station hydrographique profonde est faite en cet endroit.

Le "BAIRD" fait ensuite route vers le Nord-ouest en direction du groupe Lau et étudie la topographie sous-marine de ce groupe en s'intéressant particulièrement à la plateforme de 500 mètres de profondeur à partir de laquelle s'élèvent les îles de ce groupe en une pente extrêmement rapide. La pente très raide de ce talus sous-marin indique qu'autour de ces îles calcaires soulevées, un récif s'est formé sur une base qui a subi par la suite une subsidence dont l'importance cependant n'est pas aussi grande que celle des atolls du bassin océanique pacifique. Puis il effectue deux traversées de la fosse de Tonga, trouvant une profondeur maxima de 9 700 mètres, et arrive à Nukualofa le 23 décembre pour

H. Rotschi

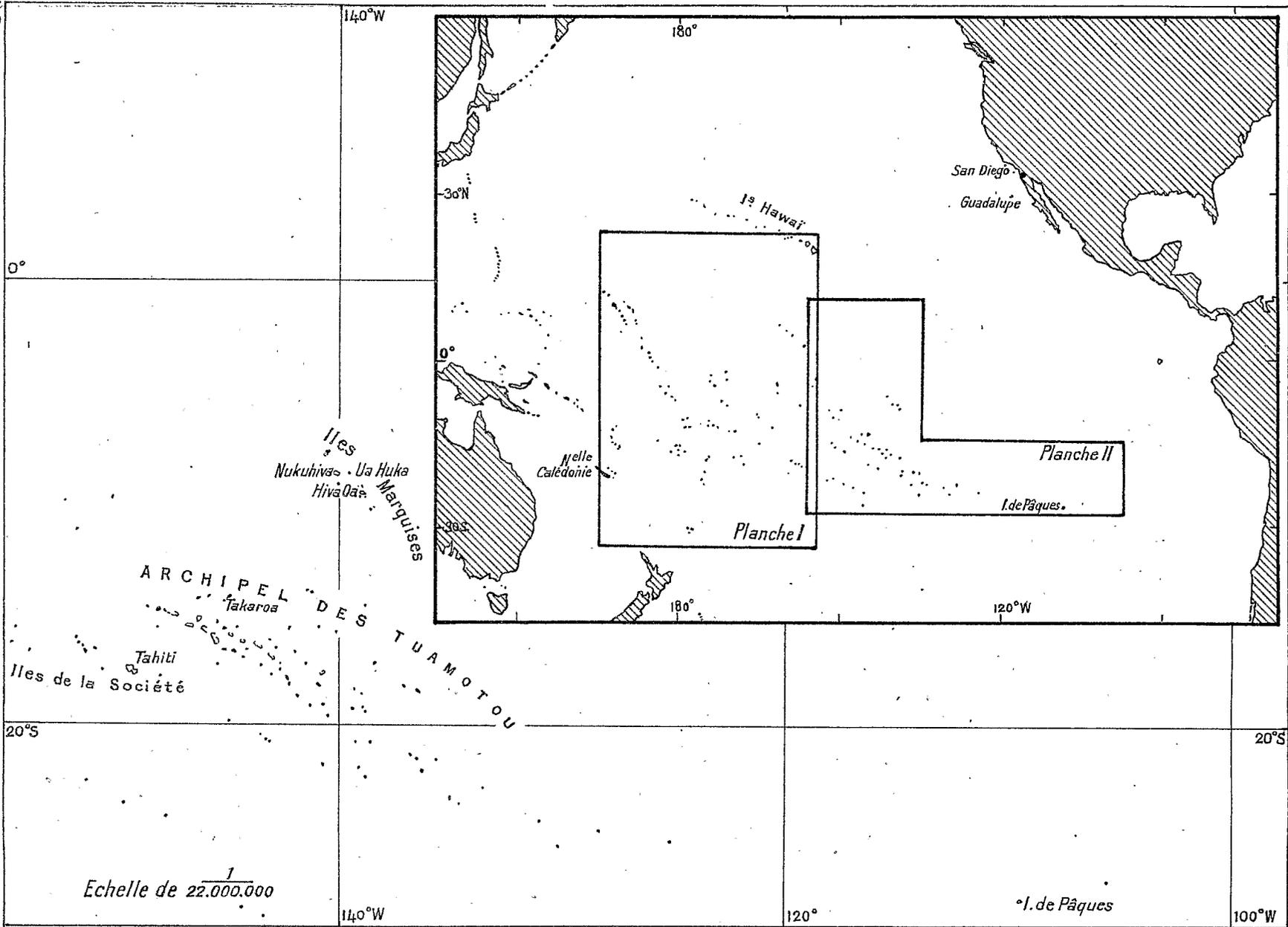


Planche II

y faire escale jusqu'au 27. Pendant ce temps, l'"HORIZON" se dirige plus au Sud, vers le seuil séparant les fosses de Tonga et de Kermadec; les sondages exécutés situent ce col à peu près à 6 400 mètres de profondeur, moins profond donc qu'on ne le pensait, mais cependant beaucoup plus que le niveau général du bassin océanique situé à l'Est. Jusqu'au 24 décembre, l'"HORIZON" sonde la partie Sud de la fosse de Tonga et découvre la partie la plus profonde du Pacifique Sud trouvée jusqu'à présent, 9 950 mètres, profondeur non corrigée pour la vitesse du son. Le col séparant les deux fosses semble être le flanc d'une montagne sous-marine.

Du 27 décembre au 7 janvier, l'expédition étudie la région de Tonga. Le plateau au nord de Tongatabu, considéré comme un terrain possible de pêche, est exploré par des scaphandriers remorqués au bout d'un filin de 40 mètres à 1,5 noeud. Ils ne trouvent qu'un plateau à l'aspect désertique et parsemé de têtes de corail. Une exploration par plongée de l'île Falcon ou Fonua Fo'ou, qui était en 1936 un volcan actif de 70 mètres de hauteur et 2 milles de longueur et est maintenant entièrement submergée, montre que le sommet est déjà recouvert de jeunes coraux.

Sur la côte Est de cette île, on trouve une rivière sous-marine dont les eaux sont chargées de matière en suspension, type "turbidity current", et qui peut être responsable d'un abaissement de quelques mètres par an du niveau général de cette île.

Le 28 décembre a lieu la septième station sismique dans la dépression de Tofua, c'est-à-dire du côté continental de la ligne andésite. Parmi les stations sismiques faites de ce côté, celle qui est située entre le banc Alexa et Fidji, et celle du bassin de Fidji montrent qu'en ces endroits la croûte terrestre est fine, c'est-à-dire que des vitesses du son supérieures à 8 km/s se rencontrent à respectivement 7 et 10,5 km sous la surface du sédiment. Les vitesses maxima enregistrées dans les autres stations sont de 7,6 et 7,9 km/s, ce qui signifie, soit que la croûte en ces endroits est plus épaisse, soit que le matériel qui la constitue est différent de celui que l'on rencontre habituellement.

Il est fait ensuite une étude bathymétrique et magnétique de la dorsale limitant à l'Ouest la dépression de Tofua, en prélevant quelques courtes carottes, et la mission se dirige finalement vers l'Est pour une étude de plusieurs jours de la fosse de Tonga. Cette étude commence par deux stations sismiques dans l'axe de la fosse à une profondeur moyenne de 9 300 mètres. Elle révèle un épaississement considérable de la croûte terrestre par rapport à ce qui a été trouvé sur le côté continental. Une tentative de carottage par 9 800 mètres échoue à la suite d'une avarie survenue au carottier; entre les poids de celui-ci on recueille cependant

des débris de lave volcanique, ce qui indique que l'appareil est allé heurter pendant la descente, et probablement longtemps, les parois et le fond volcanique dur de la fosse. Entre les deux stations sismiques, on prélève des échantillons d'eau jusqu'à 7 500 mètres et la température semble indiquer un gradient adiabatique à partir de 6 000 mètres. L'"HORIZON" drague la paroi occidentale jusqu'à 3 650 mètres et récolte du sable et de la ponce. Il fait une étude bathymétrique assez complète de la fosse, trouve sur sa face orientale une montagne sous-marine s'élevant à 7 250 mètres au-dessus du niveau du fond à cet endroit, drague et carotte cette montagne et ne réussit qu'à ramasser une courte carotte de sable calcaire consolidé. Au Nord de la fosse, il fait des mesures de courant au G.E.K. et trouve que le courant sud-équatorial s'oriente vers le Sud quand il atteint la région de Tonga.

Le "BAIRD", se dirigeant vers le Nord, fait une étude bathymétrique et magnétique de la dorsale qui prolonge l'arc des îles Tonga jusqu'à l'île Keppel.

Du 9 au 16 janvier, les navires font route de Tutuila à Tahiti, et procèdent à trois stations sismiques. Ils effectuent également plusieurs enregistrements du gradient de température au fond, et plusieurs stations hydrographiques, et prennent 13 carottes de sédiment.

Le magnétomètre marin, dont le fonctionnement a été mis au point définitivement, fonctionne de manière permanente, remorqué à cent mètres derrière le navire.

Des échantillons d'eau profonde sont prélevés respectivement à 1,3 et 5 mètres au-dessus du fond, pour permettre d'étudier par micro-filtration la teneur en suspension et de déterminer dans la sédimentation le rôle de l'eau voisine du fond. Au cours d'une étude bathymétrique et magnétique de l'île Palmerston, on constate qu'elle est de plusieurs milles plus large que ne l'indique la seule carte de cette île, levée par le Capitaine COOK.

A partir du 19 janvier, commence l'exploration des deux bassins entre les îles de la Société, les Tuamotou et les Marquises. Les carottages dans le premier bassin révèlent un sédiment récent mélangé à du tertiaire. Il est fait une étude bathymétrique et magnétique de Takaroa et deux stations sismiques entre les Tuamotou et les Marquises. Une autre station sismique étudie la structure du plateau au Sud de Nuku Hiva. L'assise volcanique sous le plateau transmet le son à la vitesse de 3,7 km/s semblable à celle trouvée dans l'étude des îles Hawaii et Guadalupe.

Le "BAIRD" fait ensuite une étude très détaillée de l'île Ua Huka au point de vue bathymétrique et magnétique et spécialement du Sud-ouest de cette île, vers la Baie Invisible où les Américains projettent d'installer un enregistreur de vagues. L'"HORIZON" en sondant découvre au Sud une montagne sous-marine en ligne avec les Marquises occidentales et deux autres alignées avec les Marquises orientales, ces deux dernières continuant la chaîne plus ou moins régulière de ces îles, au rythme d'un volcan par cinquante milles. Les études faites dans cette région semblent confirmer l'hypothèse que les deux chaînes d'îles sont d'origine entièrement volcanique et sont formées de matériaux expulsés à travers le fond de la mer.

Des Marquises, les deux navires font route vers le Sud-est en direction du plateau de l'Albatross, et exécutent une série de mesures simultanées de courant au G.E.K. pour étudier la cohérence du courant sur une distance de plus de 100 milles. Cette route est suivie jusqu'au seuil du plateau de l'île de Pâques et est mise à profit pour des études de topographie sous-marine et le prélèvement de quelques carottes. Puis, à partir du 116^{ème} degré de longitude W les navires font route vers le Nord en prenant huit longues carottes au carottier à piston et quarante-deux carottes courtes au carottier ordinaire, entre les latitudes 15° S et 15° N, à des profondeurs comprises entre 2 800 et 4 700 mètres. Toutes les carottes obtenues pendant cette partie de l'expédition, sauf une, montrent une stratification nette. Celles prélevées en eaux moins profondes et celles prises au voisinage de l'équateur ont une très haute teneur en carbonate de calcium.

Dans la partie non calcaire des carottes profondes prélevées entre les Marquises et le seuil du plateau de l'île de Pâques, on trouve une argile brun-chocolat extrêmement riche en micro-nodules de manganèse et de fer. Au sommet du seuil, une carotte de 9 mètres de long, faite de vase à globigérines sans stratification apparente, montre sous le microscope que les foraminifères sont recouverts d'une couche d'oxyde de manganèse. Deux carottes sont prélevées au voisinage de l'équateur avec un carottier de grand diamètre dans le but d'utiliser la vase à globigérines ainsi collectée pour des déterminations d'âge de sédiment par la méthode du carbone radioactif. Une carotte prise au voisinage de 9°N, longue de 9 mètres, montre dans les couches inférieures l'existence de radiolaires datant du pliocène ou du miocène. Plus au Nord, une carotte de même longueur révèle des couches inférieures datant de l'oligocène.

Sur toute la route entre les Marquises et San Diego, à intervalles réguliers, des échantillons d'eau de surface jusqu'à 100 mètres sont recueillis en vue d'une étude quantitative de la teneur en phytoplancton par mesure des pigments; cette étude est

complétée par des prélèvements d'eau toutes les quatre heures à trois mètres de profondeur. Le but de ces prélèvements est double: étude de la productivité de l'eau de mer dans la région des courants et contre-courants équatoriaux et relation entre cette productivité, et l'activité biologique qui en découle, avec la vitesse de formation des dépôts marins contenant de grandes quantités de restes organo-biologiques. Pour l'exécution de cette étude, des échantillons d'eau prélevés entre 250 et 2 000 mètres de profondeur sont filtrés sur des membranes ultra-filtrantes, et la nature et la quantité des matières en suspension sont étudiées. Sur le trajet de retour à San Diego, il est procédé à neuf stations sismiques, dont deux au-dessus du seuil du plateau de l'île de Pâques, qui révèlent un épaississement de la croûte de ce seuil lequel, au point de vue structural, pourrait être intermédiaire entre le type océanique et le type continental. Les autres stations indiquent que la nature du fond est sensiblement identique à celle du Pacifique Nord. L'épaisseur moyenne de la couche sédimentaire rencontrée sur tout le parcours ne semble pas excéder 300 mètres et quelquefois moins. Toujours sur ce seuil, une mesure du gradient de température donne une valeur trois fois plus grande que la valeur moyenne, c'est le plus grand gradient rencontré jusqu'à présent sur le fond des mers.

Dans cette région équatoriale, l'"HORIZON" fait de nombreuses récoltes de plancton, étudie les couches inférieures de l'atmosphère, effectue de nombreuses mesures de courants superficiels, et de nombreuses stations hydrographiques.

Le 21 février, les navires arrivent à San Diego.

ORGANISATION DU TRAVAIL

Il est clair, d'après ce qui vient d'être dit plus haut, que la majeure partie de l'expédition fut centrée autour des problèmes de sédimentation; "Capricorn" était une expédition géologique, géochimique et géophysique et tout le travail était organisé autour des études sismiques, qui furent l'origine et le but de cette expédition, mais qui firent naître aussi toute une série de problèmes connexes concernant la nature des sédiments et leur répartition.

Pendant que les navires étaient en marche, ils faisaient des sondages à l'ultra-son, enregistraient la température superficielle de la mer, collectaient des échantillons de plancton, prenaient des bathythermogrammes toutes les deux heures, faisaient des enregistrements des courants superficiels au G.E.K., et les observations météorologiques de routine: direction et force du

vent, température et humidité de l'air, pression atmosphérique, nébulosité, précipitations. En outre, le "BAIRD", remorquant son magnétomètre marin, enregistrait l'intensité du champ magnétique terrestre.

Lorsque ce dernier navire était en station d'écoute pour les opérations sismiques, il procédait au prélèvement de carottes courtes au carottier ordinaire et de carottes longues au carottier à piston de Kullenberg, modifié par Silverman, faisait une station hydrographique, prenait des échantillons d'eaux voisines du fond pour l'étude de leur teneur en suspension, procédait à une mesure du gradient de température du sédiment, utilisait les caméras sous-marines pour faire des photographies de la configuration des vases, et enfin, aux endroits intéressants, envoyait les plongeurs au scaphandre autonome pour faire des échantillonnages spéciaux et des études qui ne pouvaient être entreprises du bord.

Entre les stations sismiques et aux endroits jugés intéressants l'"HORIZON" faisait du chalutage profond avec le "mid water trawl", des carottages au carottier léger, des dragages de fond, des mesures de courant à la drague à courant, des stations hydrographiques spéciales et des travaux météorologiques comprenant l'enregistrement continu de la température et de la pression atmosphérique à 300 mètres d'altitude sur un météorographe remorqué par l'intermédiaire d'un "kytoon", en plus des radiosondes faites pour atteindre les couches de 20 mb.

En plus de ces travaux qui constituaient l'essentiel des recherches, quelques études annexes furent entreprises, quand le temps le permettait. Ce furent la récolte d'échantillons d'eau de pluie pour la détermination des noyaux de condensation des gouttes, une étude du gradient de concentration de l'azote combiné dans les couches inférieures de l'atmosphère, une étude des particules en suspension dans l'air, et des études sur l'électricité atmosphérique.

EQUIPEMENT

a) Etudes sismiques

Trois hydrophones suspendus à une profondeur de 70 mètres, à 300 mètres du navire, envoient leurs indications à un oscillographe travaillant sur trois bandes 10 cps., 100 cps., 1000 cps. et fournissant un enregistrement photographique.

Cet oscillographe est couplé à un oscillographe à plume donnant un enregistrement simultané à l'encre sur papier, et per-

mettant une interprétation grossière des résultats immédiatement après les explosions.

Environ 20 tonnes de dynamite ont été utilisées en 2 133 explosions.

b) Sondages à l'ultra-son

Les deux navires sont équipés d'un écho-sondeur du type N.M.C. et d'un EDO; le dernier seul, étant donné les avantages qu'il présente, fut utilisé.

L'émetteur est monté sur une colonne qui, en dehors des ports et des hauts fonds est abaissée très au-dessous du niveau de la quille, afin de réduire les interférences provenant du bruit des vagues sur la coque.

c) Carottage, dragage et ramassage

Les navires ont en tout 13 carottiers ordinaires, dont deux de 75 kg et de 5 cm de diamètre intérieur, deux de 75 kg et de 4 cm de diamètre intérieur, huit de 20 kg et de 4 cm de diamètre intérieur, un de 7 cm de diamètre.

Il y a deux carottiers à piston et 10 tubes de rechange de 10 mètres de long et 5 cm de diamètre intérieur, et 1 300 kg de poids en fonte pour charger l'appareil.

Enfin 7 dragues à rocher, 4 ramasseurs légers, 1 échantillonneur de fond "en marche" allemand, complètent l'équipement.

Des "ball-breakers" fixés sur les appareils et faisant exploser une sphère de verre lorsque ceux-ci touchent le fond sont utilisés comme indicateurs de fond.

d) Mesure du gradient de température

L'appareil enregistreur réalisé spécialement pour cette expédition se compose de deux thermistors, distants de deux mètres, logés dans un étui cylindrique long de trois mètres, large de trois centimètres, qui est enfoncé dans le sédiment de telle manière que le thermistor supérieur soit à 60 cm de la surface, le deuxième étant à deux mètres au-dessous, et qui est solidaire d'un appareil enregistreur potentiométrique du type zéro à contrôle automatique et marchant sur pile, enfermé dans un cylindre étanche capable de supporter des pressions de plusieurs milliers de

mètres d'eau. L'enregistrement du flux calorifique à travers le sédiment se fait pendant environ une demi-heure, pendant laquelle les thermistors se mettent en équilibre avec le milieu dans lequel ils sont plongés et enregistrent ensuite la différence de température entre les deux couches situées à leur niveau respectif. Pour en déduire le flux calorifique, il est nécessaire de connaître la conductivité thermique du sédiment, d'où nécessité de prélever une carotte au même endroit.

Neuf mesures furent ainsi faites, indiquant en gros un flux calorifique de $1,3 \cdot 10^{-6}$ cal cm^{-2} sec^{-1} pour la partie océanique et le double pour la partie continentale du bassin Pacifique exploré.

e) Photographie sous-marine

L'équipement comporte deux caméras spéciales :

une caméra légère construite au "Navy Electronic Laboratory" pour aller jusqu'à 3 000 mètres et comprenant deux logements, l'un contenant un appareil Robot de 35 mm capable de prendre 45 photographies consécutives, l'autre, un flash électronique, et un commutateur à mercure qui déclenche le flash au moment où l'appareil touche le sédiment. Les photographies prises ainsi par trois mille mètres de fond au large de Fidji, montrent un fond sableux couvert de "ripple marks".

une caméra plus lourde de 1 150 kg, faite pour enregistrer aux plus fortes pressions, et composée également de deux compartiments constitués par des cylindres en acier dur Timken. Le premier contient un appareil de photographie Phototronic capable de prendre 375 photographies consécutives, le deuxième, un flash électronique 20 fois plus puissant que celui de la caméra légère. L'appareil peut être déclenché soit par un mécanisme d'horlogerie pendant la descente, soit par un commutateur à mercure.

Les plongeurs sont équipés en outre de caméra portatives ou d'appareils enfermés en caisses étanches du modèle français "Tarzan" pour Foca.

f) Plongées au scaphandre autonome

Sept plongeurs utilisent l'équipement américain construit sous licence française.

Ils explorent, photographient et prennent des échantillons dans les régions peu profondes d'intérêt tout particulier et où les navires ne peuvent se rendre, notamment toute la zone sublittorale le long de la côte, et les lagons, les hauts-fonds et les bancs submergés, et les plateaux entourant les îles, jusqu'à 50 mètres de profondeur. Remorqués par un long filin, ils recherchent des fonds chalutables. Ils calibrent et réparent les appareils sous-marins; ils inspectent la coque; en tout, 75 heures de plongée.

g) Prélèvements hydrographiques.

Cinquante bouteilles Nansen sont réparties entre les deux navires et cent thermomètres à renversement.

Des cadres à renversement spéciaux sont utilisés avec des bombes à pression contenant des thermomètres à renversement pour les mesures par très grandes profondeurs. On peut aussi y adapter des bouteilles en plastique utilisées pour l'étude de la teneur en suspension de l'eau.

h) Drague à courant

C'est une croix en bois ayant une surface totale de 12 pieds carrés (un peu plus d'un mètre carré) et à laquelle est attaché un poids de 50 kg. On la suspend par l'intermédiaire d'un filin à des profondeurs variables, de 4 à 300 mètres; la mesure de l'inclinaison du filin permet de déduire le courant par rapport au navire.

i) Geomagnetic electrokinetograph G.E.K.

C'est l'appareil réalisé par Von Arx et utilisé avec de petites électrodes.

j) Bathythermographes

C'est l'équipement standard avec des appareils pouvant aller jusqu'à 300 mètres. Les 1 170 mesures effectuées s'ajoutent aux quelque 100 000 qui ont été faites jusqu'à présent dans l'Océan Pacifique et que la Scripps Institution doit dépouiller pour l'U.S. Navy. Dans certains cas, l'utilisation du bathythermographe et des enregistrements qu'il donne permet de déterminer les profondeurs dynamiques sans passer par l'intermédiaire de la salinité. La thermocline est d'autre part très importante du point de vue biologique.

k) Thermographe enregistreur

Chaque navire est équipé d'un thermographe enregistrant la température de l'eau à trois mètres de profondeur avec une précision de 0,2 degré.

l) Magnétomètre marin

Il est du type magnétomètre aérien modifié de manière que l'élément sensible puisse être remorqué par un navire. Il enregistre l'intensité du champ total, mais sa précision est limitée par l'enregistrement de bruits de fond d'origine mécanique, électrique et magnétique. Dans des conditions favorables et pendant plusieurs heures la précision relative peut atteindre ± 2 gammas, et, avec un bon calibrage, la précision absolue peut être de ± 20 gammas. L'enveloppe externe est faite de telle manière que l'appareil remorqué à 11,5 noeuds conserve toute sa stabilité.

SUJETS ETUDIÉS - QUELQUES CONTRIBUTIONSA - OCEANS, CONTINENTS ET SUB-CONTINENTS

Pendant très longtemps, l'Océan Pacifique fut considéré comme un des traits les plus stables de notre globe, mais la question de la permanence des bassins dans leur forme et leur position s'est toujours posée et est en relation étroite avec l'histoire géologique de la Terre et son origine.

La connaissance que nous avons du Pacifique a été complètement révolutionnée par les expéditions océanographiques récentes auxquelles l'impulsion fut donnée par l'expédition suédoise en mers profondes, suivie de très près par l'expédition danoise de la "Galathée", par l'expédition anglaise de la "Discovery" et par les expéditions américaines "Mid-Pacific", "Northern Holiday", "Shellback" et "Capricorn". En particulier, il est apparu que certaines régions du bassin Pacifique étaient d'un caractère tel qu'elles sont intermédiaires entre les continents et les vrais bassins océaniques, d'où leur nom de "sub-continents". Deux de ces régions ont été explorées au cours de l'expédition "Capricorn", le "sub-continent mélanésien" à l'Ouest des îles Tonga et le plateau de l'Albatross. Ce sont surtout les études sismiques qui révèlent leur caractère curieux et nous amènent à nous poser la question de l'histoire de ces régions; sont-elles des faits stables ayant toujours existé, ou sont-elles des continents disparus ou en voie de formation?

L'on verra d'après leurs caractères, comparés à ceux des bassins océaniques, quelle tentative de réponse l'on peut donner.

a) Caractère des bassins océaniques

L'étude des tremblements de terre a montré que la croûte terrestre sous le bassin de l'Océan Pacifique est beaucoup plus mince que sous les continents. On peut considérer que la distance entre le fond de la mer et la surface de discontinuité de Mohorovicic, qui est caractéristique de la croûte terrestre, est de l'ordre de 5 à 9 km, alors que l'épaisseur continentale correspondante est de l'ordre de 30 à 40 km. Au-dessus de la surface de discontinuité de Mohorovicic, on trouve une zone de 5,5 km d'épaisseur moyenne où la vitesse du son est 6,8 km/set au-dessus de laquelle repose une couche de 1,5 km avec une vitesse de 5,2 km/s. Entre cette dernière couche et le fond de la mer, on trouve une fine couverture de sédiments.

Du point de vue bathymétrie, les bassins sont caractérisés par une absence presque complète de structure plissée. Les archipels de Cook, de la Société et des Marquises sont des chaînes de volcans s'élevant directement au-dessus du fond de la mer et ne semblent pas correspondre aux sommets d'un pli ou d'un arc. Un plissement cependant supporte l'archipel des Tuamotou.

Au contraire des plis, les fractures sont très nombreuses et apparaissent souvent associées à d'importants escarpements.

Le flux calorifique à travers le sédiment est de l'ordre de $1,3 \cdot 10^{-6}$ cal cm^{-2} sec^{-1} , variant entre des limites assez larges, 0,5 entre les Tuamotou et les Marquises et 2,0 au Nord de l'équateur dans le Pacifique oriental.

Plusieurs traits semblent indiquer que dans certaines régions il y a eu subsidence, en particulier dans les îles Marshall. A Bikini, le forage à l'intérieur du lagon montre qu'à 800 mètres, on trouve encore du calcaire formé en eaux peu profondes; le dragage à 1 300 m d'une montagne sous-marine accolée à l'atoll de Bikini ramène des roches volcaniques; il en est de même pour des carottages à 2 000 et 3 000 mètres sur le talus de Bikini; les études sismiques donnent la même vitesse du son dans la base de la montagne sous-marine et le soubassement de Bikini. L'étude de Eniwetok donne des résultats sensiblement identiques, c'est-à-dire que le forage trouve une craie de formation superficielle à 1 400 mètres de profondeur et qu'au-dessous il existe du basalte. Les expéditions antérieures américaines étudiant les très nombreux guyots disséminés par tout le Pacifique ont trouvé que leur sommet plat

est en général à la même profondeur que le sommet de la montagne sous-marine attenante à Bikini et que le soubassement de Bikini. Des dragages de guyots, faisant partie d'une crête allant de la côte américaine à Hawaii, en suivant un grand cercle, ont révélé des coraux morts et des restes de coquillages vivants normalement en eaux peu profondes et reposant maintenant par 2 000 mètres de fond. Le sommet plat des guyots indique d'ailleurs qu'il fut un temps où ces montagnes atteignaient la surface de la mer où elles furent érodées par les vagues et qu'il y eut ensuite une subsidence due, soit à un effondrement du fond, soit à un relèvement général du niveau des mers, soit aux deux causes simultanées, que dans certains cas les coraux ont pu croître assez rapidement pour ne pas mourir et ont formé ainsi les atolls et que dans d'autres cas ils n'ont pas pu s'implanter ou ont crû trop lentement, ce qui a donné ces montagnes sous-marines à sommet aplati, appelées guyots. Si aucune de ces montagnes sous-marines ne fut trouvée dans le Pacifique Sud, cela peut être dû au fait que le milieu est très favorable à la croissance du corail, car la pente du talus de ces atolls est très grande jusqu'à 1 500 ou 2 000 mètres de profondeur ce qui indique une subsidence considérable.

Les premières estimations géochimiques de l'épaisseur sédimentaire faites par Clarke et par Kuenen, indiquent une épaisseur de l'ordre de plusieurs kilomètres. Les mesures sismiques couvrant une large portion de l'Océan Pacifique fournissent une épaisseur moyenne de sédiments non métamorphisés de l'ordre de quelques centaines de mètres. Cette épaisseur de sédiments correspond en gros à ce qui se serait déposé pendant 1 à 2 millions d'années, si les taux de sédimentation observés et calculés depuis le tertiaire n'ont pas changé radicalement au cours des âges. Il est donc logique de conclure de ces mesures que, si il y a eu dépôt de sédiments avant la fin du secondaire, ces sédiments âgés ne sont plus sous une forme non-métamorphisée.

b) Caractères des régions "sub-continetales"

Deux de ces régions furent étudiées, le "sub-continent" mélanésien et le plateau de l'Albatross. L'on savait déjà qu'elles différaient d'un bassin océanique, par la profondeur moindre de 1 500 mètres en moyenne, par la nature des roches qui les constituent et qui sont de type andésitique plutôt que basaltique, par leur grande activité sismique, par la vitesse relativement peu élevée des ondes sismiques de surface et par la perte élevée d'énergie par réflexion sur les surfaces des ondes voyageant en profondeur.

Les études faites pendant l'expédition "Capricorn" ont montré que, sur le plateau de l'Albatross, à des profondeurs de 7 km sous la surface, on trouvait encore des vitesses de transmission du son inférieures à 8 km/s, respectivement de 7,2 et 7,9 km/s. Cela peut provenir du fait que, dans cette région, l'épaisseur de la croûte est intermédiaire entre les cas du bassin océanique et du continent, ou que la nature de la croûte est différente de ce qui est connu partout ailleurs. Le même phénomène fut observé avec des vitesses de 7,5 et 7,9 km/s à une profondeur un peu supérieure à 7 km dans deux stations situées au-dessus du sub-continent mélanésien, alors qu'en deux autres stations des vitesses supérieures à 8 km/s apparurent à des profondeurs respectives de 10,5 et 7 km.

Au-dessous de 7 km, la vitesse du son dans les roches et leur épaisseur sont identiques dans les régions "sub-continentales" et océaniques. Donc, si celles-là sont en équilibre isostatique, il doit y avoir une différence considérable dans la distribution des densités au-dessus de 7 km pour ces deux types de régions.

L'étude bathymétrique du fond indique que les formes des régions "sub-continentales" diffèrent de celles des bassins océaniques. Les régions "sub-continentales" sont caractérisées par des bassins de 15 à 30 km de section qui ne trouvent pas d'analogue dans les bassins océaniques.

Le flux calorifique à travers le sédiment est également très différent. C'est dans les régions "sub-océaniques" que l'on a trouvé les plus fortes valeurs; $3,6 \cdot 10^{-6}$ cal. sur le plateau de l'Albatross et $2,1 \cdot 10^{-6}$ au-dessus du bassin de Fidji.

On trouve dans ces régions moins de preuves d'un changement dans le niveau de la mer. Les études sismiques effectuées au-dessus du Banc Alexa montrent une épaisseur de 800 mètres de sédiments calcaires reposant sur une surface volcanique irrégulière. Il se pourrait que les plateaux des îles Tonga et les canaux qui les séparent soient une preuve de subsidence, alors que les îles Lau et les îles calcaires de Tonga indiquent clairement qu'il y a eu un relèvement de l'ordre de 200 mètres.

c) Caractères des frontières entre ces régions

Un des faits les plus évidents est la différence de pente entre les talus continentaux et les talus "subcontinentaux", celle-ci étant de l'ordre de 0,1 degré, celle-là de 5 degrés.

Cependant, cette frontière est surtout caractérisée par la présence de fosses, fosses des Aléoutiennes, des Philippines, de Tonga-Kermadec... Comme toutes ces fosses, la dernière se distingue par de nombreux volcans actifs et éteints, de larges anomalies de gravité, une grande activité sismique. Une section Ouest-est de la fosse de Tonga présente alternativement: le "sub-continent" mélanésien profond de 2 000 à 3 000 mètres, une dorsale volcanique dont le sommet est à environ 1 300 mètres de profondeur, couronné par des îles volcaniques et des montagnes sous-marines, la dépression de Tofua de 2 000 mètres de profondeur moyenne et où les études sismiques indiquent une épaisseur moyenne de 2 000 mètres de sédiment, la dorsale principale de Tonga, de 60 à 100 mètres de profondeur, couronnée d'îles calcaires s'élevant à des altitudes entre 30 et 200 mètres, la fosse de Tonga profonde de plus de 10 000 mètres, une dorsale s'élevant à 400 mètres au-dessus du bassin Pacifique qui lui fait suite et d'une profondeur moyenne de 5 000 mètres.

De chaque côté de la fosse, la croûte est très mince, alors que, dans son axe même, elle est relativement plus épaisse, la surface de Mohorovicic étant à plus de 15 km de profondeur.

La fosse de Tonga dessine sur toute sa longueur un sillon convexe vers l'Est. A son extrémité Nord, au Sud-ouest des Samoa, elle s'oriente vers le Nord-ouest comme la ligne andésite, et se termine en une large dépression à fond plat. Comme dans le cas des fosses des Aléoutiennes et d'Acapulco, le talus bordant la ligne d'îles est plus en pente que le talus opposé, et le côté Est de la fosse est limité par une dorsale qui pourrait être couronnée de montagnes sous-marines. Le long de l'axe de la fosse, la profondeur varie entre 6 000 et 10 500 mètres, la plus grande profondeur trouvée étant approximativement de 10 330 mètres après correction pour la vitesse du son, à l'endroit où l'orientation de l'axe change brusquement. Au sud du parallèle 17° S, la fosse est en forme de V, bien que dans les parties les plus profondes, le fond soit plat vers 9 500 mètres, mais il est coupé par une faille dont les parois ont une pente très aiguë et qui est large de 3 km; le fond de cette faille, vers 10 000 mètres, est plat. Au Nord de ce parallèle, la fosse, qui offre alors un fond plat, est très largement ouverte et sa profondeur diminue vers le Nord-ouest.

B - PROBLEMES SUR LA SEDIMENTATION EN GRANDE PROFONDEUR

Le but principal de l'étude des sédiments côtiers ou formés en eaux peu profondes est la connaissance de la manière dont les roches sédimentaires ont été formées. L'étude des sédiments profonds a pour objectif la connaissance des processus phy-

siques, chimiques et géologiques qui ont présidé à leur formation. Comme ils sont déposés pour la plupart à des vitesses extrêmement lentes, une carotte de quelques mètres de longueur représente des centaines de milliers et peut-être des millions d'années de l'histoire géologique de la Terre; une étude bien conduite de telles carottes peut donc nous donner des informations extrêmement précieuses sur notre passé géologique. En outre, dans certaines parties de l'océan Pacifique, les sédiments que l'on trouve très près de la surface sont des sédiments tertiaires couverts par un mélange de matériaux récents et tertiaires; il y a là un moyen d'atteindre des périodes vieilles de 10 à 70 millions d'années. L'étude de tels sédiments, des fossiles qu'ils contiennent, peut nous renseigner sur la profondeur à laquelle ils se sont déposés, la température et la composition de l'eau de mer à cette époque et la circulation océanique à l'ère tertiaire. Il apparaît d'autre part que, dès les premiers âges de la Terre, les sédiments profonds, en raison de leur masse beaucoup plus considérable, ont joué dans les mécanismes d'érosion mécanique et chimique un rôle plus important que les sédiments côtiers et peu profonds et que les roches sédimentaires.

L'on ne peut par conséquent bien comprendre l'histoire géochimique de la croûte terrestre pendant les derniers deux à trois milliards d'années que si l'on connaît parfaitement les sédiments profonds.

Ceux-ci n'ont jamais été soulevés pour former des roches sédimentaires; on ne connaît en effet aucune roche sédimentaire dont on puisse dire actuellement qu'elle est de formation profonde. Donc les phénomènes d'érosion mécanique et de décomposition chimique suivis de sédimentation se traduisent par un bilan négatif pour la croûte terrestre; une grande quantité de matériaux est arrachée aux continents et déposée et perdue à jamais dans les bassins océaniques. L'on pourrait estimer la quantité totale de matières ainsi perdues si l'on pouvait évaluer les variations du taux de sédimentation à travers les âges géologiques, ou si l'on pouvait calculer la quantité totale érodée à la surface de la Terre et la quantité de sédiments retenus sur les continents sous forme de roches sédimentaires ou réincorporés dans les roches ignées.

On peut estimer les quantités relatives de sédiments profonds et de sédiments continentaux en comparant la composition moyenne des roches sédimentaires et celle des roches ignées qui leur ont donné naissance. Par exemple, les roches sédimentaires contiennent trois fois plus de calcium que les roches mères. Si la composition de celles-ci n'a pas changé, on doit admettre que pour chaque unité de masse de roche sédimentaire formée, trois unités

de roches ignées ont été détruites et qu'au moins deux unités correspondant au résidu ont été transportées à la mer. De tels calculs ont été faits par Goldschmit, Clarke, Kuenen et ce dernier est arrivé à la conclusion que la masse totale des sédiments profonds formés au cours de l'histoire géologique de la Terre représente au moins six fois la masse des roches sédimentaires actuelles et qu'en conséquence, l'épaisseur moyenne des sédiments marins doit être de l'ordre de 3 km.

Le type prédominant de sédiment récent dans les bassins océaniques est fortement calcaire, boues à globigérines en particulier. Si la sédimentation en mers profondes a conservé à travers l'histoire le même caractère, cela signifie que des quantités anormalement élevées de carbonate de calcium ont été déposées puisque, à la fois, les roches sédimentaires et les sédiments seraient plus riches en calcaire que les roches mères. On est donc obligé d'en conclure que le caractère des sédiments profonds formés a changé radicalement au cours des temps, que pendant une très longue période les sédiments marins contenaient de très faibles quantités de calcaire; en fait ils devaient être plus pauvres en calcaire que les roches ignées, et les sédiments actuels sont un accident.

D'autre part, calcium et magnésium exceptés, tous les éléments majeurs des roches ignées y sont plus concentrés que dans les roches sédimentaires; il s'ensuit qu'ils doivent s'être accumulés en solution dans l'eau, comme c'est le cas du sodium, ou dans les sédiments profonds.

C'est le cas pour le manganèse, le phosphore, le titane, le fer, qui peuvent y être jusqu'à dix fois plus concentrés que dans les roches sédimentaires, et pour nombre d'autres éléments rares, tels que nickel, cobalt, zirconium, chrome...

Les considérations géochimiques précédentes sont limitatives, mais ne permettent guère de répondre aux questions fondamentales relatives à la masse totale des sédiments profonds déposés pendant toute l'histoire géologique de la Terre, à leur composition et à celle des roches mères et aux variations dans ces compositions et dans leur vitesse de formation, à travers les âges. On a cru très longtemps que ces sédiments formaient une couche mince uniformément répartie sur tout le fond des mers, mais les informations récoltées au cours des dernières expéditions d'après-guerre ont montré que cette image était beaucoup trop simple. La nature et la vitesse de la sédimentation varient largement d'un point à un autre et d'un moment à l'autre, de sorte que le processus entier de sédimentation est extrêmement complexe.

Un sédiment profond se compose essentiellement de fines particules d'argile, d'hydroxyde de fer, de quartz et d'autres minéraux transportés des continents à la mer par les vents ou par les rivières et les courants marins et qui précipitent ensuite, de squelettes calcaires et siliceux d'animaux planctoniques vivant à la surface de la mer, de verres volcaniques et de petits cristaux minéraux rejetés par des volcans terrestres ou sous-marins, de matériel précipité à partir de la mer suivant différents procédés chimiques ou physico-chimiques.

Tous ces matériaux se déposent lentement et uniformément et tendent à recouvrir de la même manière le fond de l'océan; mais différents facteurs s'unissent pour perturber cette sédimentation uniforme et pour transporter les particules dans le sens horizontal, de sorte que le taux d'accumulation du sédiment varie largement avec le lieu. Le transport sur le fond tend également à remplir les creux au détriment des parties en relief. D'une manière générale donc, l'accumulation de matière sur les hauteurs sera très lente et même, dans certains cas, l'on peut observer l'érosion, par des courants horizontaux, du sommet des collines sous-marines de telle manière que des sédiments vieux de plusieurs dizaines de millions d'années gisent sous quelques mètres de sédiments plus récents ou sont même exposés à la mer. Dans d'autres régions, en particulier au pied de reliefs assez élevés et importants, le dépôt à l'air est si rapide que la couverture de sédiment n'est pas plate, mais forme une pente très douce s'étendant sur plusieurs centaines de kilomètres. Pour expliquer le transport et le dépôt en certains endroits de grandes quantités de matériaux, on fait appel en général aux courants de turbidité qui sont capables de déposer plusieurs dizaines de centimètres de sédiment en quelques jours, alors que le taux normal de sédimentation est de l'ordre du centimètre par mille ans.

Une fois déposés, tous les composants du sédiment ne conservent en général ni la forme ni la structure qu'ils avaient antérieurement. C'est la conséquence de modifications chimiques survenant au sein du sédiment et détruisant les composants originaux pour former d'autres minéraux. Un exemple typique de ces minéraux formés au sein du sédiment est la phillipsite.

Les problèmes qui, apparemment, sont les plus urgents à résoudre si l'on veut acquérir une meilleure connaissance des sédiments sont donc: détermination de la vitesse à laquelle se sont formés les différentes couches de dépôts, détermination de l'influence de la topographie sur le taux de formation et le caractère des sédiments, détermination des proportions relatives des constituants continentaux et des constituants volcaniques; transformations de structure se produisant au sein du sédiment, rôle de

stratification des dépôts et leur emploi pour estimer les dates et les caractères des événements géologiques au cours du Pleistocène, distribution des fossiles et des sédiments tertiaires et leur signification, épaisseur des sédiments.

Il nous est possible, après l'expédition "Capricorn" de jeter un peu de lumière sur ces problèmes.

En ce qui concerne le taux de sédimentation en mers profondes, deux méthodes étaient à notre disposition jusqu'à présent. La première utilisait les stratifications glaciaires et post-glaciaires dans le sédiment; elles posaient à priori que l'on pouvait relier les couches sédimentaires aux périodes glaciaires et interglaciaires du Pléistocène et qu'il y avait synchronisation entre la circulation dans les tropiques et le retrait et l'avance des glaces dans l'Amérique du Nord et en Europe. La deuxième utilisait la décroissance de la radio-activité en fonction de la profondeur; elle négligeait la possibilité d'adsorption de l'uranium et surtout de l'ionium et leur diffusion, qui peuvent déranger considérablement l'équilibre radioactif. L'emploi du carbone radioactif ne présente aucun de ces inconvénients et, au contraire, sa période est telle qu'il est aisé de dater des sédiments relativement récents, pléistocènes ou post-pléistocènes, alors qu'on ne pouvait le faire en utilisant le radium ou l'ionium. Il est évident que, pour de telles déterminations, la quantité de sédiment nécessaire est telle qu'on ne peut opérer que sur des sédiments riches en calcaire et, autant que possible, sur de grosses carottes. C'est la raison pour laquelle nous avons récolté des carottes de gros diamètre dans la région de l'équateur recouverte de boue à globigérines, carottes qui permettront sans doute de dater le sédiment à moins de 1 000 ans près. Le radio-beryllium, formé lui aussi dans les couches supérieures de l'atmosphère et dont la période est beaucoup plus grande, peut servir de la même manière à dater des sédiments qui se déposent plus lentement.

Des carottes larges furent aussi recueillies à cet effet dans des régions où le sédiment est pauvre en calcaire.

Il a été fait mention de l'importance théorique des courants horizontaux et des courants de turbidité sur la nature des sédiments. Elle est démontrée d'une manière éclatante par un certain nombre de carottes prélevées au sommet de collines ou de montagnes sous-marines et où les sédiments tertiaires étaient très près de la surface, sinon à la surface même. Des études sismiques ont montré, d'autre part, l'épaisseur relativement grande de la couche sédimentaire dans certains bassins. Cela met en évidence le rôle de la dispersion des particules du sédiment par des courants irréguliers ou oscillants qui tendent à nettoyer les sommets et à

remplir les creux, si bien qu'actuellement la plus grande partie du relief océanique est masquée par une couverture de sédiment.

Dans une grande partie de la région Nord de l'océan Pacifique, le sédiment profond est fait de particules d'argile mélangées à du quartz finement divisé. Ces éléments pourraient être d'origine continentale. Entre Samoa et les Marquises, le sédiment est en général brun chocolat et contient beaucoup de verres volcaniques et de micronodules de manganèse et de fer et un grand nombre de cristaux de phillipsite. A une certaine distance des volcans, la proportion relative de matériel volcanique diminue, ainsi que le nombre de phillipsites, mais la couleur reste la même. L'étude comparée de ces types de dépôts peut fournir une méthode pour la détermination de la proportion relative de matériaux d'origine continentale et d'origine volcanique sous-marine. Une telle étude demande évidemment la connaissance des mécanismes qui modifient la structure des particules une fois qu'elles sont intégrées dans le sédiment et qui sont tous d'ordre chimique ou physico-chimique; d'où la nécessité d'analyses de l'eau interstitielle et de l'eau sus-jacente. Les études faites pendant l'expédition "Capricorn" montrent que la silice est environ dix fois plus concentrée dans celle-là que dans celle-ci et que la concentration augmente avec la profondeur dans le sédiment. Il est donc évident que la silice est dissoute sous l'effet de la pression et d'un changement dans le pH de l'eau, mais on ne peut dire actuellement si cette silice vient des verres volcaniques, des minéraux, de l'argile ou des squelettes siliceux de radiolaires. Cependant, comme le pourcentage de ceux-ci diminue avec la profondeur, on peut soupçonner que leur disparition est due à la dissolution. Le rapport $\text{NH}_3/\text{NO}_3\text{H}$ est plus élevé dans les carottes que dans l'eau sus-jacente, ce qui pourrait signifier que l'eau interstitielle est moins oxydante et, comme ce rapport croît avec la profondeur, qu'elle devient de plus en plus réductrice.

Dans une région où la sédimentation n'a pas été troublée par des courants de turbidité ou par des courants horizontaux, une carotte de 10 mètres de long représente l'histoire géologique intégrale de l'océan pendant peut-être plusieurs millions d'années.

A l'examen d'une telle carotte, et l'expédition suédoise en mers profondes, ainsi que l'expédition "Capricorn" en ont prélevé de nombreuses, on découvre une stratification très nette dans la quantité et la nature des fossiles qu'elle contient; une telle stratification doit être évidemment le reflet des conditions de dépôt et constitué donc un enregistrement du climat des périodes passées. Par exemple, dans la région eupélagique du Pacifique tropical et oriental, les couches superficielles du sédiment contiennent moins de carbonate de calcium et de diatomées et plus de

foraminifères vivant en eau chaude que le sédiment situé 10 à 20 centimètres au-dessous. En s'enfonçant dans le sédiment, on traverse des couches alternées et les fluctuations dans la teneur en calcaire décroissent à mesure que l'on s'approche du bout de la carotte. Cette stratification doit refléter les changements qui se sont produits dans la circulation océanique et dans le caractère des eaux de surface durant les périodes glaciaires et post-glaciaires du Pléistocène. Pour avoir une idée exacte de l'importance de ces facteurs climatiques, il faut avoir une idée sur les relations entre la productivité de la mer et le caractère des sédiments qui sont en dessous et pouvoir déterminer aussi loin que possible les effets des variations de productivité sur une grande région. Cela implique des études détaillées de la circulation atmosphérique, de la circulation océanique et des propriétés chimiques des eaux en mouvement, de la nature du phytoplancton, de sa vitesse de croissance et de son influence sur la croissance des foraminifères et des radiolaires, et enfin de la composition et de la vitesse de dépôt des différents constituants du sédiment. C'est ce que l'on fit pendant toute la durée de l'expédition en effectuant des prises de plancton à intervalles réguliers et en étudiant la répartition de la chlorophylle et d'autres pigments dans le système des courants et contre-courant équatoriaux. Les courants superficiels furent étudiés au G.E.K. et pourront aider à notre connaissance des divergences et des convergences qui semblent jouer un rôle si grand dans la productivité de la mer. La quantité et la nature des matières en suspension dans l'eau furent déterminées par ultra-filtration et examen microscopique d'échantillons d'eau recueillis à des profondeurs variées et principalement très près du fond.

Enfin, l'épaisseur des sédiments a été étudiée à chaque station. L'épaisseur du matériau ayant une vitesse de transmission du son inférieure à 4 km/s est partout inférieure à 500 mètres, alors que, sur une grande partie du Pacifique, l'on rencontre une vitesse de 5,2 km/s à moins de 300 mètres de la surface. Nous avons vu que des considérations géochimiques imposent une épaisseur de sédiment d'au moins 3 km. La vitesse de 5,2 km/s ne peut correspondre à un sédiment consolidé, à moins que ce ne soit une craie cristalline, et nous savons que les sédiments anciens doivent être moins calcaires en général que les récents. Nous sommes donc obligés de faire appel à d'autres notions pour expliquer la différence entre les quantités calculées et les quantités mesurées. Il se pourrait que les calculs géochimiques soient faux, et l'on verra que les recherches postérieures à l'expédition les confirment dans une certaine mesure, ou que les couches inférieures du sédiment aient disparu ou aient été métamorphosées. Actuellement, si l'on admet que le taux de sédimentation est de l'ordre de 1cm/1 000 ans, ce qui paraît pour le Pacifique un chiffre raison-

nable, l'épaisseur mesurée correspondrait au dépôt pendant moins de 50 millions d'années; en faisant jouer une contraction du sédiment, un taux de sédimentation plus bas pour les périodes antérieures au Pleistocène, on arrive péniblement à 100 ou 200 millions d'années, ce qui nous pousse à la conclusion que, s'il y a eu sédimentation avant la fin du secondaire, les sédiments formés ont disparu ou tout au moins ne sont pas sous une forme non métamorphisée ou métamorphisée connue.

C - CONTRIBUTION A L'ETUDE DES RECIFS DE CORAIL

Au point de vue du géologue, les récifs coralliens constituent de très intéressants témoins de niveau, sur lesquels sont enregistrés tous les changements du niveau de la mer survenus au cours des périodes géologiques récentes. D'autre part, l'étude des récifs vivants peut conduire à une meilleure connaissance des récifs morts et des craies fossilisées que l'on trouve en grande extension et qui, dans de nombreux cas, sont des réservoirs potentiels de pétrole. Du point de vue de l'océanographe et du biologiste, la relation entre un récif et les organismes qui le construisent d'une part, les vagues et les courants qui le façonnent d'autre part, est un sujet passionnant.

Il y a cependant, au sujet des récifs, un grand nombre de questions auxquelles on ne peut encore répondre. Ce sont par exemple la distribution géographique des récifs; dans certaines régions qui apparemment seraient favorables au développement des récifs, on n'en trouve pas ou peu; d'autre part, au-dessus de la ligne des basses mers, les atolls sont très rapidement érodés; au-dessus de la ligne des marées hautes, nous savons que l'érosion est due à l'action dissolvante de l'eau de pluie; mais c'est dans la partie qui couvre et découvre avec la marée que l'érosion semble être la plus active; une érosion chimique paraît difficile à concevoir, alors que les eaux environnantes sont toujours saturées ou même sursaturées en carbonate de calcium dissous; il ne reste que l'érosion mécanique et l'on peut se demander si elle est assez importante pour avoir pu aplanir au niveau des marées basses de larges atolls comme il en existait au Pléistocène. La question de l'origine des atolls n'a pas encore reçu de réponse parfaite; nous savons que dans certains cas, en particulier pour les atolls des îles Marshall, c'est la théorie, due à Darwin, de la subsidence qui est vraie, mais il existe de nombreuses régions où les évidences de subsidence manquent complètement. La forme et la structure des atolls sont également des questions pleines de mystères; on ne peut expliquer complètement la forme du récif extérieur, large et plat, à peu près au niveau des basses eaux, avec un talus très en pente du côté sous le vent et moins du côté au

vent, ni le lagon dont la profondeur est extrêmement variable et qui est rempli de débris coralliens de toutes sortes, ni les têtes de corail dans le lagon, aux parois presque verticales et dont le sommet couvert d'une végétation luxuriante est à quelques centimètres de la surface, ni les passes qui sont parfois aussi profondes que le lagon lui-même.

L'expédition "Capricorn" a eu la possibilité d'étudier plusieurs récifs coralliens modernes ou fossiles et les observations faites apportent une petite contribution à la solution de ces problèmes.

Sur l'emplacement de l'île Falcon qui, en 1936, était un volcan actif et qui disparut depuis lors sous l'action des vagues, les plongeurs ont trouvé un plateau couvert de sables et de graviers, entouré d'un anneau basaltique dont le sommet en certains endroits est à quelques mètres de la surface et sur lequel des coraux sont en train de prospérer. Ces colonies de corail n'ont pas plus de 20 ans.

Un exemple typique de région qui paraît favorable à la croissance des coraux et où les atolls sont pratiquement inexistants est donné par les îles Marquises, où l'on ne trouve que quelques récifs frangeants bouchant de petites baies. Il semble qu'il n'y ait que douze espèces de corail vivant bien que la température moyenne de l'eau soit de l'ordre de 26°C, bien au-dessus des limites de tolérance du corail. On a attribué cette absence, soit à une rapide subsidence, soit au manque d'un plateau d'érosion suffisant autour des îles, soit à l'occasionnelle arrivée de grandes masses d'eau froide causant une chute importante de la température. Les études bathymétriques de l'expédition "Capricorn" autour de Ua Huka, Hiva Oa et au large de Nuku-Hiva montrent qu'il y a au contraire autour de ces îles un très large plateau de plus d'un mille de large et parfois même deux; vers 90 mètres de profondeur, on trouve une rupture de pente et aucune surface plane ne peut indiquer une subsidence à de plus grandes profondeurs. Les études sismiques indiquent que les plateaux sont coupés dans des roches volcaniques recouvertes d'une très mince couche de sédiment non consolidé. La profondeur à laquelle se trouve le plateau, sa pente de 1 à 3 degrés et son faciès indiquent nettement qu'il fut coupé par les vagues pendant les périodes du Pléistocène où le niveau de la mer était à son minimum. Sa largeur et les falaises verticales qui forment le rivage actuel indiquent qu'aucun relief n'est venu diminuer la force érosive de la mer à cette époque, donc que le corail n'était pas plus abondant que maintenant. On peut sans doute trouver là une des raisons de l'absence de corail. Apparemment, l'érosion aérienne et marine a joué un rôle très important dans ces îles et la quantité de débris entraînés à la mer

a pu être telle que les coraux n'ont pu s'établir ni sur un tapis sédimentaire qui sans cesse glissait vers le large, ni dans des eaux d'une grande turbidité. A la fin de la période glaciaire, le relèvement du niveau des eaux rendit impossible l'établissement des coraux, sauf dans la zone côtière où l'érosion continue des falaises le prévint.

Parmi les atolls fossiles étudiés, on peut citer le Banc Alexa et le plateau au Nord de Tongatabu. Morphologiquement, ils sont identiques à des atolls vivants et les études sismiques ont donné des résultats similaires à ceux obtenus à Bikini et à Eniwetok, avec une épaisseur de sédiment calcaire de l'ordre de mille mètres. Ils diffèrent cependant par les détails. La surface du lagon est couverte de débris calcaires, de sables et de graviers, dissimulés parfois sous des taches de lithothamniom vivant ou mort. Le récif lui-même, au lieu d'être plat et large, a la forme d'un v renversé; il n'y a pas de passes. Les profondeurs indiquent qu'à la fin du Pléistocène, les coraux ont commencé à croître vigoureusement, puis se sont éteints, sans qu'il soit actuellement possible d'expliquer les raisons de leur mort.

Un des problèmes les plus intéressants au point de vue de la physico-chimie des atolls est l'érosion chimique qui se fait au détriment des couronnes de récifs et surtout à la surface de ceux-ci. Cependant, l'eau qui entoure les récifs est toujours saturée ou sursaturée en carbonate de calcium dissous. Nous ne pouvons donc faire appel qu'à des phénomènes de dissolution à une échelle très petite; c'est ainsi que dans le récif de Tahiti à l'aube, l'eau d'un "pool" de petite dimension et recouvert au fond d'une abondante végétation a montré un pH de 6,4 alors que l'eau de la mer était à 8,2. Il doit donc se produire des phénomènes de micro-solution qui méritent d'être étudiés.

D - LE MAGNETOMETRE, LA BATHYMETRIE ET LA NAVIGATION

Les anomalies du champ magnétique représentent des changements dans la constitution ou la structure des roches ignées sous-jacentes; l'interprétation des seules anomalies est extrêmement difficile, mais couplées avec les données de la bathymétrie, elles présentent de nombreux renseignements sur la structure des fonds marins; des anomalies bathymétriques non confirmées par des anomalies magnétiques peuvent être considérées comme certainement dues aux couches sédimentaires elles-mêmes. Si, au contraire, une formation corallienne, par exemple, est reconnue comme ayant une base basaltique, il est possible à l'aide des deux instruments combinés de tracer la ligne de démarcation entre cette dernière et la couverture sédimentaire.

Une étude très détaillée de Ua Huka fut ainsi faite. C'est une île constituée par un volcan dont la moitié méridionale manque. On peut y voir ce qui reste de deux énormes cratères disposés l'un dans l'autre et, sur la côte Sud, quelques cônes et noyaux volcaniques parasites. Au large de cette côte Sud, le champ magnétique est extrêmement tourmenté, avec au moins trois régions d'anomalies négatives; ceci pourrait être dû à d'autres noyaux volcaniques immergés actuellement et correspondant à ce qui a disparu de l'île, qui devait avant érosion être deux fois plus grande.

Les deux instruments associés ont été utilisés pour déterminer la dérive du navire pendant l'étude de montagnes sous-marines. Dans un tel accident topographique, les contours bathymétriques et les contours du champ magnétique sont en général des ellipses dont les grands axes sont perpendiculaires. A chaque point correspond donc une profondeur et un champ magnétique bien définis; si deux routes du navire se croisent, il suffit de porter sur un graphique l'intensité du champ magnétique en fonction de la profondeur à intervalles réguliers, toutes les minutes par exemple; chaque route donne ainsi une courbe et l'intersection des deux courbes donne le moment où les traces se sont rencontrées, la profondeur de la mer et l'intensité du champ magnétique en ce point.

Dans les régions à fort relief bathymétrique et magnétique, il est donc possible de faire le point en utilisant les deux mesures.

C O N C L U S I O N

L'expédition "Capricorn" fut donc une expédition géologique; tout son temps a été absorbé par un programme qui s'est étendu au-delà des limites prévues, et il n'a presque plus été possible de se consacrer aux études qui n'étaient pas liées directement aux problèmes de la sédimentation. C'est ainsi que le programme biologique ne fut exécuté que dans des proportions extrêmement réduites: prises de plancton au filet vertical et au filet oblique, deux chalutages au "mid-water trawl" et des récoltes de nuit.

Cependant la contribution apportée par l'expédition à la connaissance de la sédimentation est considérable, et ceci compense cela.

De nouvelles techniques furent mises au point, en particulier l'emploi du magnétomètre marin et, dans une certaine mesure, celui d'un écho-sondeur très perfectionné donnant une excellente définition du fond. De nouveaux sujets furent abordés ou examinés

sous des aspects entièrement nouveaux et l'on peut dire qu'après l'"Expédition suédoise en mers profondes", les expéditions de la Scripps Institution of Oceanography donnent un nouvel aspect aux recherches à la mer, par l'utilisation d'un laboratoire de bord qui, malgré ses petites dimensions, constitue grâce à son équipement moderne un outil de travail remarquable, avec lequel il nous a été permis de faire toutes les études que rendaient urgentes des altérations survenant dans certaines propriétés physiques et chimiques des matériaux collectés.

C'est ainsi que toutes les analyses d'eau de mer et d'eaux interstitielles furent faites à bord, sauf la salinité, et qu'un grand nombre d'autres déterminations sur le sédiment furent rendues possibles dans ce laboratoire. De nombreuses heures de travail à terre furent ainsi gagnées et des propriétés, qui ne se seraient pas conservées avec le temps, purent être étudiées. Ceci nous permit en outre de fixer le programme de travail de chaque jour en fonction des résultats fournis par les études de laboratoire et de rendre ainsi l'expédition plus fructueuse.

Le rôle de la topographie sous-marine sur la circulation océanique et les phénomènes géologiques, géophysiques et géochimiques a été mis en évidence d'une manière éclatante, et parallèlement l'intérêt qu'il y a à équiper un navire océanographique avec un écho-sondeur dont les performances dépassent largement celles des appareils courants.

Il est bon de signaler pour finir que les sédiments marins constituent le dernier réservoir des ressources qui, arrachées aux continents par l'érosion, se sont accumulées dans les bassins océaniques pendant des milliers de siècles. Ceci a abouti à la formation de dépôts qui, sans être particulièrement riches, n'en sont pas moins relativement concentrés en éléments tels que le manganèse, le fer et tous les éléments rares, et que l'"United States Geological Survey" a déjà soulevé la question de l'exploitation du manganèse déposé sous forme de concrétions manganifères extrêmement abondantes dans tout le Pacifique. Cela peut paraître actuellement un peu prématuré, mais il est bon cependant d'avoir fait un inventaire complet des ressources de la mer, non seulement au point de vue biologique, mais aussi au point de vue minéral.