

CYAMEX

naissance d'un océan

IFREMER Bibliothèque de BREST



OEL11408

CNEXO

00
- 2

18207

→ { B 100 - NAI - N
B 330 - NAI - N ?

PROJET

RITA

RIVERA

Diego
1886-1957

TAMAYO

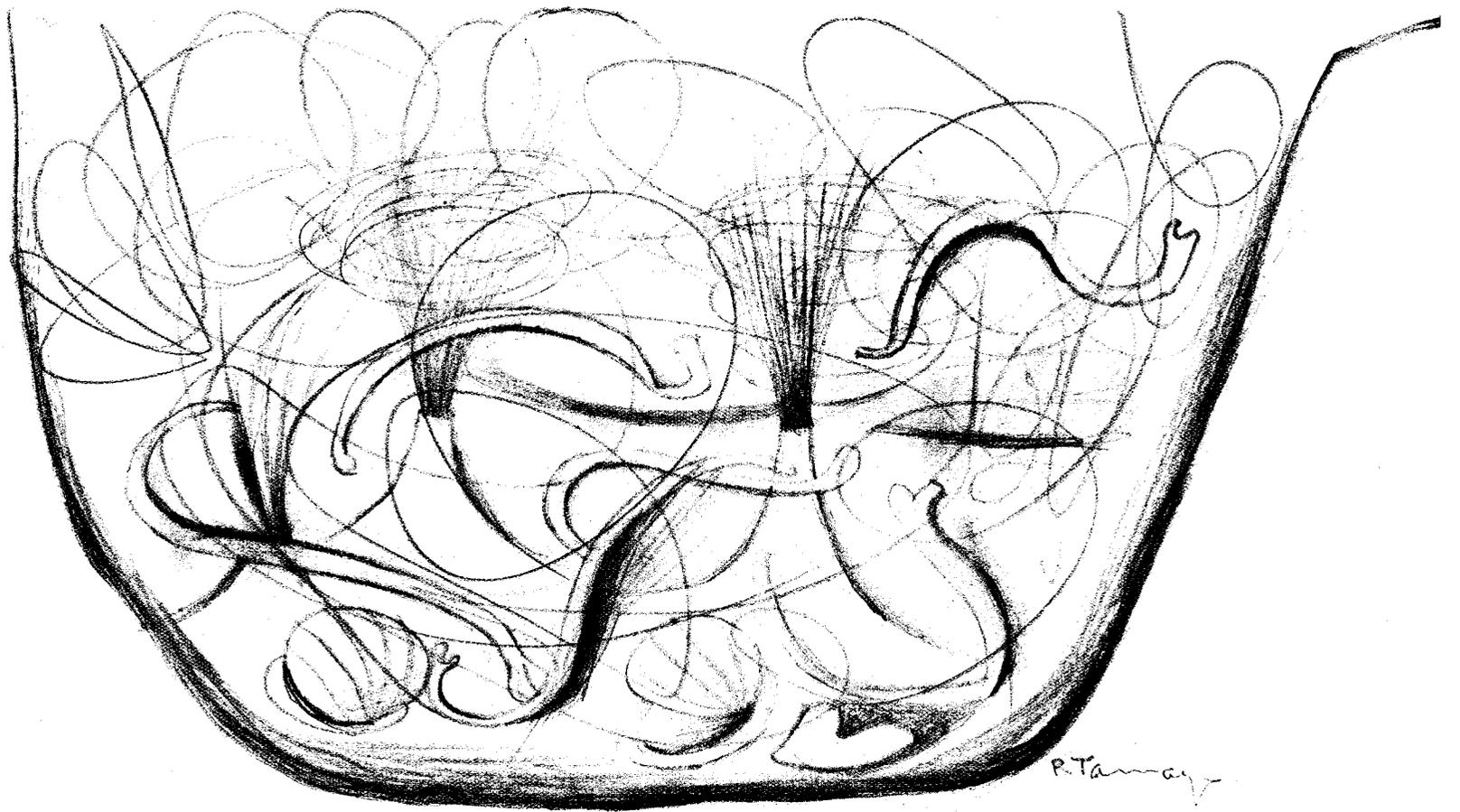
Rufino
1899 ...

Peintres mexicains contemporains
dont le nom a été donné à deux zones de fracture de la dorsale du Pacifique Est

CYAMEX

CYANA

MEXIQUE



Composition par Rufino Tamayo (1979). Vision par l'artiste des sources chaudes de la dorsale du Pacifique Est.

Drawing by Rufino Tamayo, 1979. The hot springs of the East Pacific Rise.

naissance d'un océan

birth of an ocean

sur la dorsale du Pacifique Est

the crest of the East Pacific Rise

CYAMEX

11 février - 28 mars 1978

Jean FRANCHETEAU

David NEEDHAM

Thierry JUTEAU

Claude RANGIN

Jean FRANCHETEAU - David NEEDHAM

Centre Océanologique de Bretagne, Brest (29)

Thierry JUTEAU

Université Louis Pasteur, Strasbourg (67)

Claude RANGIN

Université Pierre et Marie Curie, Paris-VI (75)

L'EXPÉDITION CYAMEX

THE EXPEDITION CYAMEX

DÉCOUVERTE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST

THE DISCOVERY OF THE EAST PACIFIC RISE

LE SUBMERSIBLE EN ACTION

THE DEEP-SEA SUBMERSIBLE IN OPERATION

LA DORSALE MÉDIO-OCÉANIQUE

THE MID-OCEANIC RIDGE

GENÈSE DU FOND DES OCÉANS

CREATION OF NEW OCEAN FLOOR

ÉVOLUTION PRÉCOCE
DE LA CROÛTE OCÉANIQUE

EARLY EVOLUTION OF OCEANIC CRUST

RICHESSSES ET OASIS

METALS AND OASES



1. **Sommet de pilier, basalte orné de verre.** A 2 600 mètres de fond, ces piliers sont les témoins de lacs de laves disparus. Diamètre : environ 1 mètre.

Two thousand six hundred metres below the surface of the ocean, pillars of basaltic rock striped with glass stand as witnesses of vanished pools of lava. Close-up photograph of the top of a pillar. Diameter about 1 metre.

L'EXPÉDITION CYAMEX : UNE PHASE DU PROJET INTERNATIONAL RITA

THE EXPEDITION CYAMEX : PART OF THE INTERNATIONAL PROGRAMME RITA

L'idée de conduire une opération en submersibles sur la dorsale du Pacifique Est est née pendant les conversations en mer à bord du « Marcel Le Bihan », le navire-support du bathyscaphe Archimède, dans les derniers jours de l'expédition FAMOUS, en septembre 1974. Les premiers pas sérieux furent faits à la fin de 1975 par des scientifiques de France et des Etats-Unis et, en avril 1976, à la Scripps Institution of Oceanography (La Jolla, Californie), on discuta d'un programme de plongées sur la dorsale du Pacifique Est à 21° de latitude Nord. Le projet fut officiellement proposé au cours d'une réunion à La Jolla en septembre 1977, entre Français et Américains. Ce projet fut accepté comme partie intégrante du programme d'accord scientifique bilatéral pour l'océanographie entre La France et les Etats-Unis à la réunion de Bandol, fin 1977, entre le CNEXO (Centre National pour l'Exploitation des Océans) et la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration). Le programme des plongées devait s'intégrer dans une vaste étude géologique et géophysique, utilisant à la fois des navires océanographiques et des submersibles. Des scientifiques mexicains furent invités à participer à ce projet baptisé RITA, du nom des zones de fracture Rivera et Tamayo qui encadrent la zone d'étude. CYAMEX (Cyana-Mexique) constitua la première phase de plongées du programme.

C'est Mazatlan, dans l'Etat de Sinaloa au Mexique, qui servit de port d'attache à Cyana et à son navire-support le Nadir pendant l'expédition Cyamex, en février et mars 1978. Au total, vingt deux plongées furent effectuées : douze dans la zone axiale de la dorsale du Pacifique Est à 21° nord et dix distribuées entre la province à l'ouest de l'axe de la dorsale et la faille transformante Tamayo à 23° nord. Pour une durée totale de 70 heures passées sur le fond, on a parcouru une quarantaine de kilomètres, soit à peu près deux kilomètres par plongée, et récolté quarante huit échantillons de roche en trente sept stations.

La seconde phase importante du projet Rita fut l'expédition RISE (Rivera Submersible Experiments), conduite un an plus tard avec le submersible américain Alvin et consacrée surtout à une étude géophysique sur le fond. Quatre des vingt plongées de l'Alvin ont été réservées pour la géologie pendant qu'une importante couverture photographique était réalisée à l'aide d'un poisson profond Angus (Acoustically Navigated Geophysical Underwater Survey System), remorqué de la surface. L'expédition Rise a orienté ses études sur la zone axiale de la dorsale à 21° N, là où Cyana avait découvert un champ de bivalves géants, c'est-à-dire au sud de la zone d'étude principale de Cyamex.

Un programme de sismologie, qui utilise des instruments posés sur le fond de l'océan, ROSE (Rivera Submersible Experiments) a été réalisé début 1979 au niveau de la zone de fracture Orozco et de la crête de la dorsale du Pacifique Est vers 12° nord. Il a marqué la troisième et ultime phase du programme Rita.

Le succès de ce programme a déjà permis de réaliser deux nouvelles séries de plongées avec le submersible Alvin : l'une pour continuer les recherches sur la faille transformante Tamayo déjà explorée par Cyana, l'autre pour échantillonner les fluides émanant des sources de sulfures à haute température découvertes pendant Rise.

The idea of conducting a diving experiment on the East Pacific Rise grew out of conversations on board the Marcel Le Bihan, the support ship of the bathyscaph Archimède, during the FAMOUS field programme in 1974. Firm steps were taken at the end of 1975 by scientists from France and the United States, and a proposal to dive on the Rise at 21 degrees North was discussed at the Scripps Institution of Oceanography in La Jolla, California, in April 1976. The project was officially proposed at a meeting at Scripps in September 1977, when a formal French delegation met with representatives of the United States. At a meeting between CNEXO and NOAA in Bandol, France, towards the end of 1977, the project was accepted as a Franco-American cooperative effort within the framework of the existing bilateral scientific agreement between the two countries. The project was to be part of a general geological-geophysical programme using both surface ships and submersibles. Mexican scientists agreed to participate in the programme, which became known subsequently as RITA (an acronym derived from the names of the Rivera and Tamayo Fracture Zones). The first diving expedition was CYAMEX, named after Cyana and Mexico.

Cyamex took place in February and March 1978, with Cyana and the mother-ship Nadir operating out of Mazatlan, Mexico. Twelve dives were made in the crestal area of the East Pacific Rise at 21 degrees North, and ten other dives were divided between areas west of the Rise crest and areas within the Tamayo Fracture Zone. The overall coverage on the sea floor was about forty kilometres for a total time of about 70 hours. The average distance travelled per dive was thus nearly two kilometres. Forty-eight rock samples were taken, distributed among thirty-seven stations.

The second major phase of Rita was the expedition RISE (Rivera Submersible Experiments) with its emphasis on geophysical studies conducted from the United States' submersible Alvin. Four dives out of a total of twenty were set aside for geological work, and parallel photographic studies were conducted from the surface, using the deep-flying fish Angus (Acoustically Navigated Geophysical Underwater Survey System). The Rise studies were concentrated in the crestal area of the Rise at 21 degrees North where the giant clams were found during Cyamex, that is, immediately to the south of the area where most of the Cyamex dives took place.

An ocean-floor seismology project named ROSE (Rivera Ocean Seismic Experiment), conducted in early 1979 on the East Pacific Rise crest near 12 degrees North, marked the third and final phase of Rita.

Several new operations were conceived on the heels of the Rita programme including two series of dives by Alvin that have already been carried out : one to make further investigations of the Tamayo Transform Fault, and the other to sample the waters of the hot sulphide springs discovered during Rise.



DÉCOUVERTE DE LA DORSALE DU PACIFIQUE EST

L'existence d'une ride médiane dans l'océan Atlantique a été pressentie dès les premières compilations de sondages dispersés. La preuve de l'existence d'une barrière à peu près ininterrompue pour la circulation océanique profonde a été apportée par les mesures de la température de l'eau près du fond, effectuée pendant l'expédition **Challenger** des années 1872 à 1876. Au cours de cette expédition, on a également découvert une région peu profonde entre le Chili et l'île de Tahiti ; on sait aujourd'hui que c'est une partie de la dorsale du Pacifique Est. L'identification complète de la dorsale, qui ne s'est achevée que récemment, a demandé que soit réalisée une synthèse bathymétrique à partir des lignes de sonde de nombreuses expéditions océanographiques. On s'est aussi guidé sur l'association étroite entre les tremblements de terre et l'axe de la dorsale.

La cartographie de la dorsale du Pacifique Est a posé, au début, de nombreux problèmes. En effet, certaines parties de la dorsale sont situées dans les eaux les moins fréquentées du globe. La dorsale n'a qu'une faible activité sismique et elle présente de nombreux rameaux, marqués par des alignements de hauts fonds, avec ou sans activité sismique, qui ne laissent pas apparaître de prime abord une quelconque unité structurale. Il faut se rappeler aussi que les sondeurs par écho n'existaient pas avant la Seconde Guerre Mondiale, et que les acquisitions de sondes ne se faisaient que très lentement. A la fin de la guerre 1939-1945, un certain nombre de hauts fonds topographiques avaient été découverts dans le Pacifique oriental, mais le tableau d'ensemble était encore confus. Les données bathymétriques s'accumulèrent rapidement après la guerre, notamment grâce aux navires de soutien de la Marine américaine, engagés dans les eaux antarctiques lors des expéditions **Highjump** et **Deepfreeze**. Il devenait clair, à partir de nouveaux résultats, que de nombreuses élévations et plateaux du Pacifique Oriental s'intégraient en une dorsale unique. Cependant, il restait encore de grosses lacunes au milieu des années cinquante. Il a fallu attendre l'Année Géophysique Internationale (1957-1958) pour que la Scripps Institution of Oceanography oriente une partie de ses campagnes océanographiques sur la dorsale du Pacifique Est. Les trois expéditions **Downwind**, **Dolphin** et **Doldrums** de la Scripps ont fourni des informations capitales et ont marqué les premiers pas vers la compréhension de la morphologie et de la structure d'ensemble de la dorsale du Pacifique Est, et vers la découverte d'un flux de chaleur interne élevé dans les régions axiales de la dorsale.

Autrefois appelée, au sud de l'Equateur, dorsale de l'île de Pâques ou plateau de l'Albatros, la dorsale du Pacifique Est s'étend du golfe de Californie, où elle pénètre dans le continent nord-américain, jusqu'à l'Océan Pacifique Austral où elle devient, vers le cinquantième parallèle, la dorsale Pacifique-Antarctique. Plus vaste que l'Amérique du Sud, la dorsale du Pacifique Est s'étend sur huit mille kilomètres de long et deux mille kilomètres de large, avec un relief moyen de trois kilomètres au-dessus des bassins océaniques adjacents, soit la moitié de l'altitude de la Cordillère des Andes.

2. **La dorsale du Pacifique Est** s'étire sur 8 000 km, au sud du Golfe de Californie. Sa crête rocheuse et fracturée s'élève à plus de 3 000 m au-dessus des bassins abyssaux. La croûte océanique, créée à l'axe de la dorsale, ira se consommer au fond des fosses et sous les arcs volcaniques de la « ceinture de feu », à l'ouest et au nord du Pacifique.

The East Pacific Rise runs south from the Gulf of California for 8 000 kilometres, its fractured rocky crest rising as much as 3 000 metres above the sediment-covered basins of the abyssal floor. As new ocean crust is created at the axis of the Mid-Oceanic Ridge, older crust is consumed, much of it in the trenches of the volcanic island-arc "ring of fire" around the western and northern edges of the Pacific.

3. **Le golfe de Californie.** Jeune océan né de l'arrachement de la Basse Californie à la terre mexicaine. Les plongées Cyana se situent à l'entrée du Golfe (photo satellite NASA).

The Gulf of California, a young ocean, was created as the peninsula of Baja California was rafted away west-northwestward from the mainland of Mexico. The area of the Cyana dives is south of the mouth of the Gulf.

THE DISCOVERY OF THE EAST PACIFIC RISE

The earliest indication of the presence of a median ridge in the Atlantic Ocean resulted from the compilation of scattered soundings. Proof that there must be a nearly continuous barrier to the deep-ocean circulation came subsequently from the measurements of bottom-water temperatures made during the celebrated Challenger Expedition of 1872-1876. The Challenger Expedition also discovered the shallow area between Chile and Tahiti that we now know to be part of the East Pacific Rise. The full identification of the Rise, not achieved until quite recently, followed from syntheses of the collected soundings of many expeditions and from the guide provided by a preferential association of earthquakes with the axis of the Mid-Oceanic Ridge.

The task of mapping the East Pacific Rise in the early days posed many problems. Some parts of it lie in very remote waters; the Rise is, comparatively speaking, only weakly seismic and there are many spurs, marked by shoals or earthquakes or both, that seemed at first not to be part of any coherent structural entity. Most importantly, the continuous echo-sounder did not exist before the 1939-1945 World War, and depth measurements before that time were therefore acquired slowly. By the end of the War, various new topographic highs in the eastern Pacific had been found and named, but the picture was still confusing. After the War, bathymetric data began to be acquired relatively rapidly, notably — in the early days — by United States supply-ships engaged

in the Antarctic Expeditions High Jump and Deep Freeze. The new data made it apparent that many of the known hills and plateaus in the eastern Pacific were part of a single bulge or rise. However, in the middle fifties there were still big gaps. At about this time, the Scripps Institution of Oceanography undertook to focus some of its exploratory cruises on the Rise as a contribution to the International Geophysical Year (1957-1958). The expeditions Downwind, Dolphin and Doldrums provided much valuable information and, in a sense, marked the first of the final steps towards revealing the main shape and surface structure of the Rise as we know it today, and towards demonstrating that in the crestal area of the Rise heat flows out from the earth at an abnormally high rate.

Once called Easter Island Ridge south of the Equator, the East Pacific Rise has for many years been the name used for the whole stretch of Mid-Oceanic Ridge from the Gulf of California, where it disappears into the continent, to the far South Pacific, where it merges with the Pacific Antarctic Ridge near 50 degrees South. Roughly eight thousand kilometres long and two thousand kilometres wide, the Rise covers an area larger than South America and its crest stands half the height of the Andes, or about three kilometres, above the floors of the adjacent ocean basins.

LE SUBMERSIBLE EN ACTION

THE DEEP-SEA SUBMERSIBLE IN OPERATION

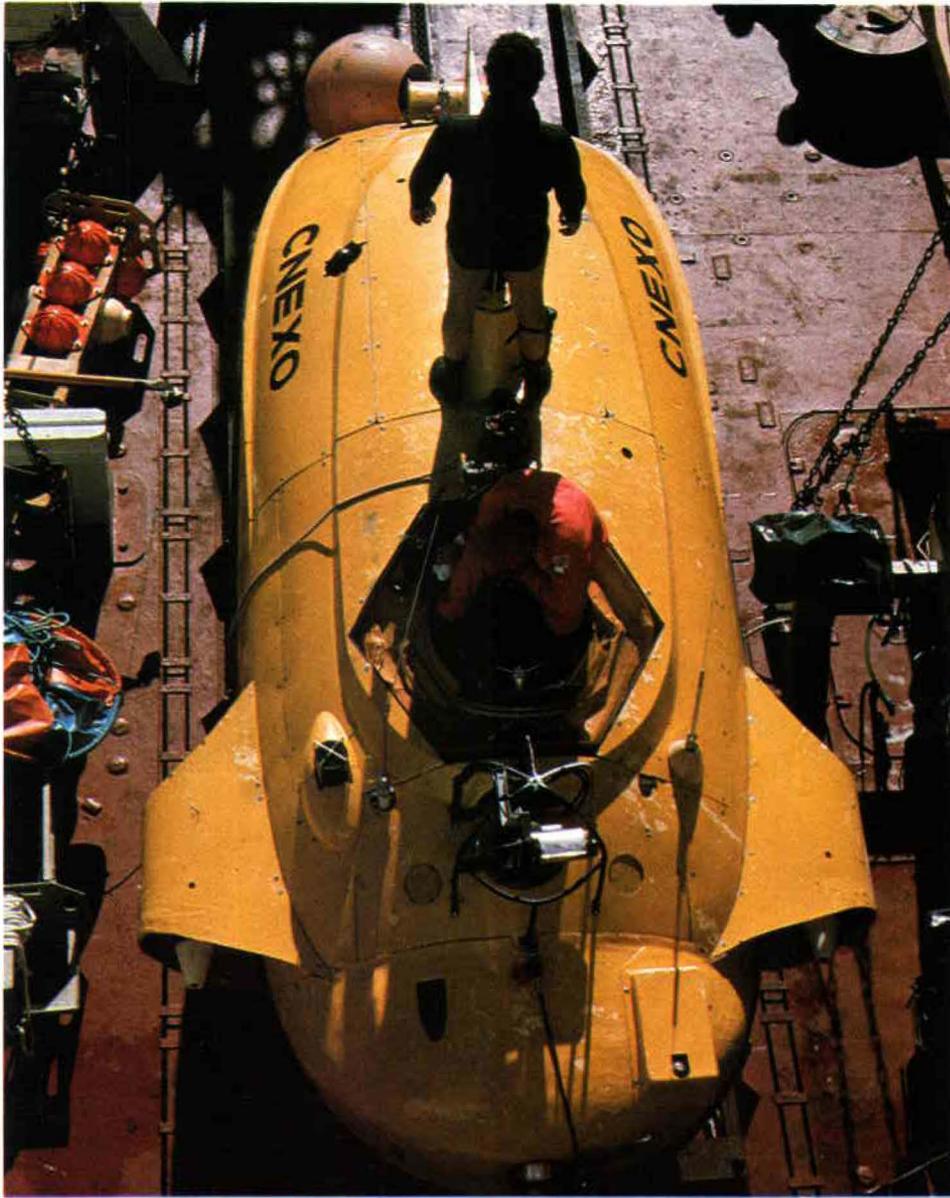


4

4. Préparation de la première plongée (février 1978). Sur l'avant, on remarque le projecteur entre les deux hublots, la caméra photographique à gauche. Caréné dans l'aile, l'un des moteurs. Sur le sommet, le sonar panoramique. Debout : R. Kientzy (Canoë), chef pilote de Cyana ; J. Francheteau, observateur, descend dans la sphère.

Cyana, before being lowered over the stern of the Nadir. Front-on view of the submersible, showing flood lamp between the two portholes, propulsion motor on the wing, the panoramic sonar on top, and the photographic camera.

5



5. **Vue plongeante de Cyana.** Debout, le plongeur Ch. Blasi.

Vertical view of Cyana.

6. **Le Nadir, navire-support du submersible français Cyana.**

The submersible Cyana on the after-deck of the mother-ship Nadir.

6



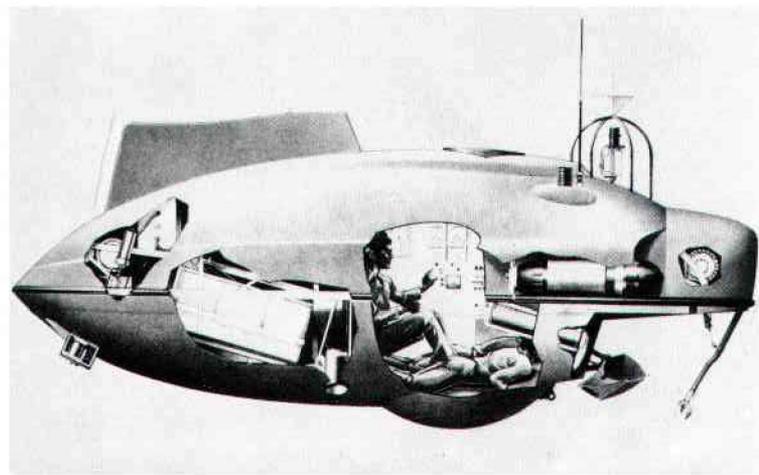
Un sous-marin est un petit véhicule indépendant piloté par l'homme et conçu pour travailler sous l'eau. Contrairement au sous-marin, le sous-marin dépend d'un navire-support pour assurer un certain nombre d'opérations techniques entre les plongées, de même qu'un avion de court rayon d'action doit être entretenu entre les vols. Les sous-marins de grande profondeur les plus employés aujourd'hui pour l'exploration des fonds océaniques, tels que les sous-marins américains **Alvin**, **Deep Quest**, **Sea Cliff** et **Turtle** ou la soucoupe française **Cyana**, peuvent tous plonger à des profondeurs d'au moins 1 900 mètres. Deep Quest peut plonger à 2 400 mètres, Cyana à 3 000 mètres et Alvin à 4 000 mètres, une profondeur qui correspond à une pression hydrostatique de 412 kilogrammes par centimètre carré soit 412 atmosphères. Les seuls sous-marins conçus pour descendre l'homme dans les profondeurs les plus grandes de l'océan, au-delà de 10 000 mètres, sont les bathyscaphes **Trieste** et **Archimède**. Trieste est, depuis son record du fossé des Mariannes, limité à 6 000 mètres. Quant à Archimède, sa dernière plongée date de 1974.

La plupart des sous-marins sont construits autour d'une sphère standard de deux mètres de diamètre, résistante à la pression, qui protège les occupants et contient, en plus des divers appareils et instruments, tous les systèmes nécessaires à la vie. Le système qui contrôle l'atmosphère respirée par les plongeurs ajoute de l'oxygène, élimine le gaz carbonique exhalé et maintient l'air recyclé à la pression atmosphérique. Les moteurs et batteries principales sont à l'extérieur de la sphère, attachés à la charpente du sous-marin et donc soumis à la pression ambiante.

Une des contraintes principales imposées aux sous-marins de grande profondeur, à part la résistance des éléments à de hautes pressions, est celle du contrôle de la flottabilité. Les températures très basses qui règnent aux grandes profondeurs peuvent affecter, tout autant que les fortes pressions, le fonctionnement des divers matériels, dont les moteurs électriques. Le sous-marin doit aussi être équipé de son propre système d'éclairage pour naviguer dans l'obscurité totale des abysses.

Avant la mise à la mer, des lestés sont ajoutés au sous-marin pour lui assurer une flottabilité négative. L'énergie nécessaire pour la descente est ainsi fournie par la seule gravité. En approchant du fond, les lestés de descente sont largués pour amener le sous-marin en équilibre. Pour le travail sur le fond, un système de propulsion par moteurs électriques permet la grande maniabilité nécessaire aux déplacements en terrain accidenté, aux observations proches et à l'échantillonnage. A la fin de la plongée, du lest est largué et le sous-marin remonte à la surface sous la seule poussée d'Archimède. En général, la flottabilité des sous-marins est assurée par de la mousse de haute densité formée de petites billes de verre. Les bathyscaphes, quant à eux, sont obligés d'utiliser des volumes énormes d'essence légère pour assurer leur flottabilité, malgré leur poids important.

Cyana, la soucoupe utilisée pendant l'expédition Cyamex, porte le nom de la célèbre héroïne qui plongea avec son père Scyllias sous les navires de la flotte perse de Xerxès, lui infligeant un immense désastre.



7. La soucoupe Cyana (écorché). En plongée, pilote et observateur scientifique sont couchés vers l'avant, les yeux aux hublots, le navigateur est assis derrière eux.

Cut-away view of Cyana. The pilot and scientist recline, looking forward; the navigator-engineer sits behind them.

A submersible is a small, self-contained, manned vehicle that is dependent on a support ship for servicing between dives, much as a short-range aircraft has to be serviced between flights. The submersibles that are in most frequent use today for ocean floor research, Alvin, Deep Quest, Sea Cliff and Turtle, which belong to the United States, and the French submersible Cyana, can all operate in water depths of at least 1 900 metres. Deep Quest can dive to 2 400 metres, Cyana to 3 000 metres and Alvin to 4 000 metres, a depth corresponding to a hydrostatic pressure of 412 kilogrammes per square centimetre, equivalent to 412 atmospheres. The only deep-diving vehicles ever built to carry man to the greatest depths, below 10 000 metres, are the bathyscaphs Trieste and Archimède. Trieste, for many years now, has been used only to 6 000 metres and Archimède has not been in operation since 1974.

Most submersibles are constructed around a pressure-resistant sphere, about 2 metres in diameter, which houses the occupants and contains various instruments and controls and a life-support system which adds oxygen, removes exhaled carbon dioxide and maintains the recirculating air at a pressure equal to one atmosphere. The motors and the main batteries are outside the sphere, within the free-flooding external shell, and are exposed to ambient pressure.

Apart from the difficulties that high hydrostatic pressures impose, the main problem to be overcome in designing a vehicle for deep-sea operations is that of controlling buoyancy. The near-freezing temperature of the deep ocean coupled with the high ambient pressure can affect the performance of various components, including electrical motors, and must also be considered in the design of a submersible, as must the total darkness of the deep sea, which makes it necessary for submersibles to carry their own lighting systems.

Before launching, additional weights are added to the submersible to make it sink under the pull of gravity. On approaching the sea floor, the descent weights are released to bring the submersible to nearly neutral buoyancy. Electrical motors are then used to drive the submersible forward, to negotiate difficult terrain, or to manoeuvre it for close-up photography or for taking samples. At the end of a dive, the remaining weights are dropped and the now positively buoyant submersible returns to the surface. The buoyancy of the submersible is normally provided by syntactic foam. The bathyscaphs carry instead large volumes of petrol to compensate for their great weight.

Cyana, the submersible used during the Cyamex expedition, weighs 8.5 metric tons. The shell is 5.7 metres long, 3.04 metres wide and 2.1 metres high. The sphere, located forward within the shell, is made of Vascojet 90 steel 3.05 centimetres thick, has an external diameter of two metres and carries three people: a pilot, a navigator-engineer and a scientist. There are two large plexiglass portholes, one for the pilot, the other for the scientist, and these are located so that each gives a forward-looking view. The life-support system has an endurance of seventy-two hours.

The submersible is fitted with lead-acid storage batteries, which can supply 47 kilowatt hours of electrical power, and it can reach a maximum speed of about three knots using two 1.5 horsepower, direct-current electrical motors. The ascent and descent speed is 0.4 metres per second, which in practice allows for five to nine hours of work at a depth of 2 000 to 3 000 metres. When near the sea-floor, Cyana usually moves at about one knot or less, the speed being limited in part by the available illumination and by the danger of obstacles. Traverses as long as ten kilometres can be made, but in rough terrain, or when the batteries are in heavy use for sampling and photography, a typical distance covered is two to three kilometres. By transferring 105 kilogrammes of mercury between compartments in the nose and the stern it is possible to tilt the submersible 28 degrees up or down from the horizontal.

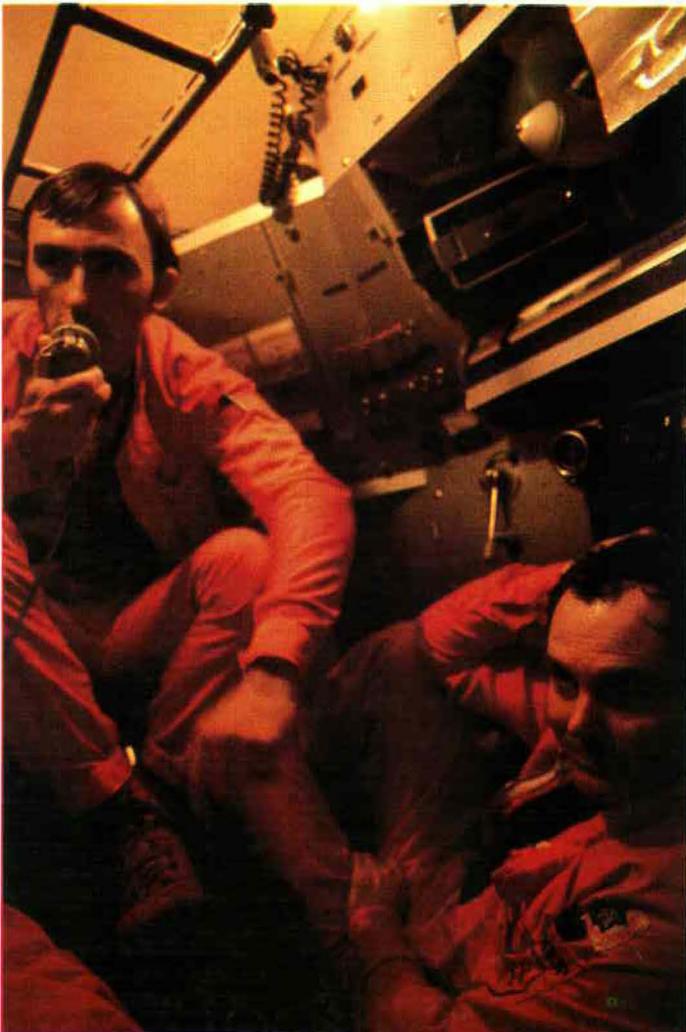
Communication with the surface usually takes place every half-hour by way of an underwater telephone, the voice information being transmitted through the water as a modulated acoustic signal. The range of the telephone system is about ten kilometres.

Reconnaissance dives can be undertaken without any external navigational aids, using only speed, heading and the altitude of the



8. **La plongée est suivie à bord du Nadir.** La position, calculée par ordinateur, est transmise à Cyana. C. Caillart (dr.), responsable des opérations et P. Plasseraud (g.).

On board the Nadir, following the progress of the submersible during a dive.



9. **A l'intérieur de la sphère,** H. Le Roux, pilote (à dr.), J. L. Nivaggioli, navigateur (à g.).

Inside Cyana's sphere.

La soucoupe a 5,7 mètres de long, 3,04 mètres de large, 2,1 mètres de haut et pèse 8,5 tonnes. Sa sphère de deux mètres de diamètre extérieur est située à l'avant. Elle est constituée d'une paroi d'alliage d'acier spécial Vascojet 90 de 3,05 centimètres d'épaisseur. Elle embarque trois personnes : un pilote, un ingénieur-navigateur et un observateur scientifique. Il y a deux grands hublots en plexiglass, l'un pour le pilote et l'autre pour le scientifique, qui partagent tous deux la même vue vers l'avant. La durée maximum de survie dans la sphère est de soixante douze heures : trois jours... L'énergie de Cyana est fournie par des batteries acide-plomb qui donnent 47 kilowatt-heure, et permettent d'atteindre une vitesse maximum d'environ trois nœuds (1,50 mètres par seconde) grâce à deux moteurs électriques de 1,5 chevaux chacun, alimentés en courant continu.

La descente et la remontée se font à une vitesse de 0,4 mètre par seconde, ce qui laisse par plongée cinq à neuf heures de travail sur le fond, pour des profondeurs de 2 000 à 3 000 mètres. En général, Cyana se déplace sur le fond à une vitesse d'un nœud ou un peu moins, car la vitesse est limitée par les conditions d'éclairage, et par la nécessité d'éviter les obstacles qui peuvent surgir à tout instant. En principe, par plongée, on peut effectuer des traversées de dix kilomètres sur le fond mais dans la pratique, lorsque le terrain est accidenté ou que les batteries sont constamment sollicitées par l'échantillonnage et la prise de vues, on ne dépasse guère deux à trois kilomètres. On peut aussi donner à Cyana une assiette de 28 degrés vers le haut ou vers le bas en transférant 105 kilogrammes de mercure vers l'avant ou vers l'arrière. La communication de routine avec la surface est assurée toutes les trente minutes au moyen d'un téléphone sous-marin. La voix est transmise à travers l'eau de mer sous la forme d'un signal acoustique modulé. On peut, avec ce système, communiquer jusqu'à dix kilomètres de distance.

Des plongées de reconnaissance peuvent s'effectuer, sans l'aide de moyen de navigation externe, en utilisant uniquement les indications de vitesse, de cap et d'altitude du submersible. Mais lorsque l'on s'engage dans les études détaillées, un système de navigation précis devient indispensable. On prépare donc les plongées en installant sur le fond deux, trois, ou même quatre, balises acoustiques qui serviront de repères fixes pour la navigation. Le navire de surface est localisé en coordonnées géographiques grâce aux satellites de navigation du système américain Transit ou à d'autres techniques comme la radio-localisation. On obtient, par simple transfert, les positions géographiques et aussi les positions relatives des balises et leurs profondeurs, si l'on mesure en plusieurs instants les distances entre le navire et toutes les balises acoustiques. Grâce à ces méthodes, la précision de la navigation du submersible, équipé lui aussi d'une balise acoustique, est de l'ordre de quelques mètres par rapport au champ de balises, et la précision de la navigation absolue est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Au cours d'une plongée, le système de navigation acoustique installé à bord du navire-support donne tour à tour la position du navire et celle du submersible. Ce « point » est aussitôt transmis au submersible par le téléphone sous-marin.

Quatre vingt dix pour cent de la lumière du jour est absorbé dans les 150 premiers mètres sous la surface de la mer. Peu importe alors que l'on plonge de jour ou de nuit puisqu'il règne en permanence une obscurité totale. C'est essentiellement pour des raisons pratiques que les plongées débutent en général le matin. Lorsque le navire-support est arrivé sur le site de plongée, Cyana est mise à l'eau avec ses trois occupants, et des plongeurs larguent ses amarres. Arrivé sur le fond, l'équipage du submersible travaille en équipe. L'observateur scientifique est responsable du trajet de la soucoupe : il choisit les sites d'étude, prend des vues du fond avec les caméras photographiques extérieures et enregistre toutes ses observations sur la piste sonore de l'enregistrement d'images télévision qui fonctionne en continu pendant toute la plongée. Des instruments placés dans la sphère du submersible donnent en permanence la profondeur sous la surface, l'altitude au-dessus du fond, le cap suivi et la température de l'eau. Une centrale des données permet d'enregistrer toutes ces mesures sur une bande magnétique. D'autres instruments permettent de contrôler la qualité de l'atmosphère respirée par les plongeurs et le taux de charge des batteries de la soucoupe.

Le prélèvement « in situ » d'échantillons précis constitue un aspect important des programmes de plongées à but géologique. Lorsque l'observateur a choisi et photographié l'échantillon qu'il désire, le pilote manipule le bras articulé hydraulique pour effectuer le prélèvement. Trois paniers d'échantillons sont attachés à la coque de Cyana pour recevoir les roches ou les sédiments récoltés.

Leur poids ne peut cependant excéder cinquante kilogrammes. Le bras télémanipulé sert aussi à placer ou récupérer certains appareils de géophysique mis en place sur le fond.

submersible. When Cyana is engaged in detailed studies however, more precise control is needed. Preparation for a series of dives then includes the deployment of two, three or more acoustic transponders, which are used as fixed navigational references on the sea floor. The relative locations, geographic co-ordinates, and depths of the transponders are determined from the support ship by repeatedly obtaining acoustic ranges between the transponders and the ship and simultaneously determining the ship's position using satellite fixes or other navigational aids. With this method, under ideal conditions, the position of the submersible can be established with an internal or relative accuracy of a few metres and an absolute accuracy of as little as a few tens of metres. While a dive is in progress, the acoustic navigational system on board the ship alternately gives the position of the ship and that of the submersible. The position of the submersible is sent to it using the underwater telephone.

Because it is completely dark on the ocean floor — ninety per cent of sunlight is absorbed within 150 metres of the sea surface — it is of little consequence whether one dives by day or night. For various practical reasons however, most dives start in the morning. When the support ship is on station, Cyana, with its three-men diving team, is lowered into the water and swimmers cast the lines free. Once on the sea floor the team works together, the scientist's main tasks being to determine the submersible's course, select targets of interest, control an external camera used for still photography, and record his observations on a video-tape recorder linked to a television camera which operates uninterruptedly. Throughout the dive, instruments inside the sphere continuously display depth, altitude above the sea floor, compass heading and sea-water temperature and log all these data on magnetic tape. Instruments also monitor the functioning of the life-support system and the condition of the batteries.

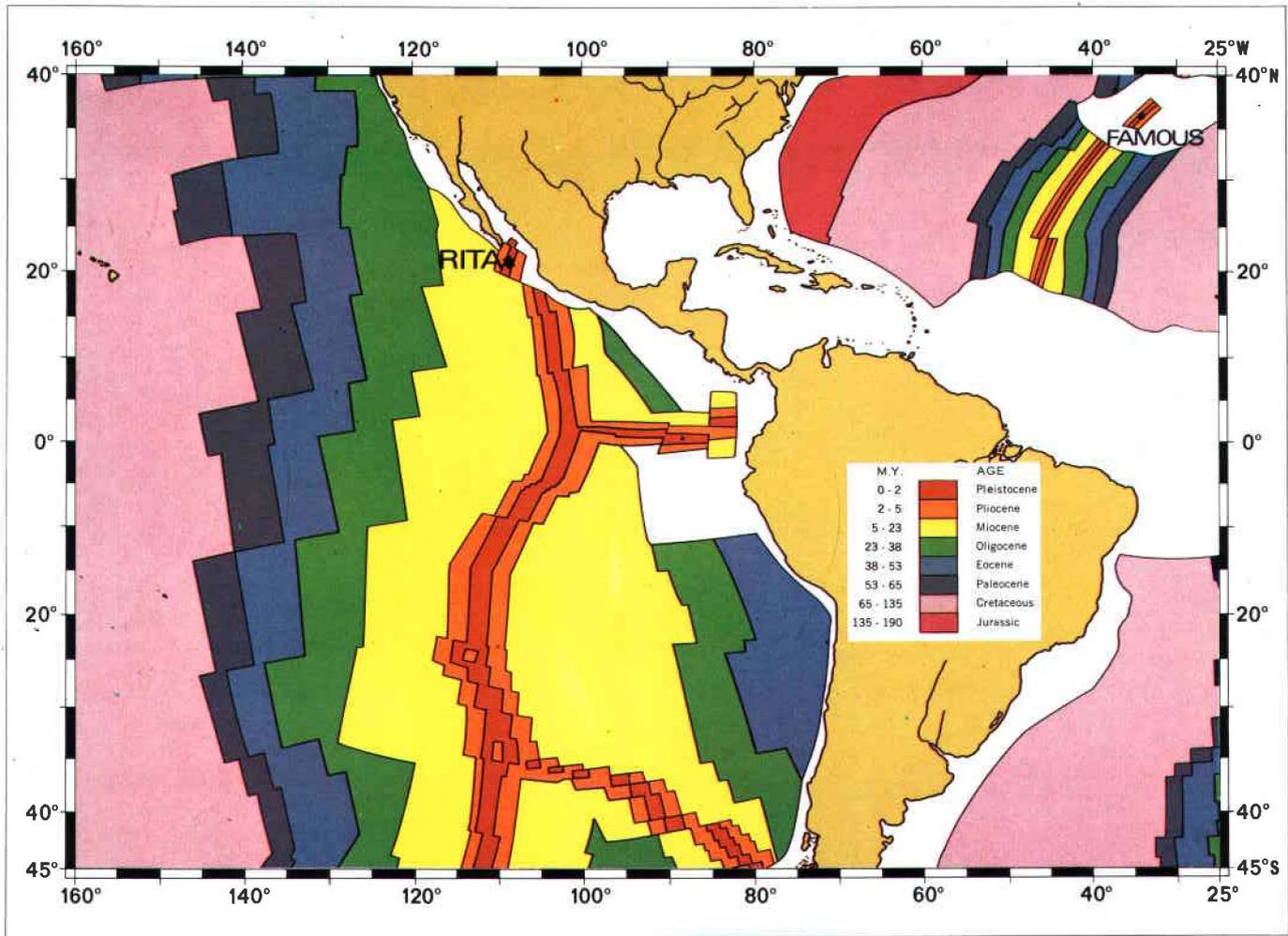
In the routine procedure for the recovery of rocks, which is an important goal of many geological dives, the scientist chooses the sample he wants and, after the pilot has manoeuvred Cyana into position, photographs it in its undisturbed setting. The pilot then picks up the sample with the mechanical arm and places it in one of three containers attached to the frame of the submersible. In order to preserve the positive, unweighted buoyancy of Cyana, the samples must not weigh a total of more than fifty kilogrammes. The mechanical arm can be used also to set out on the sea floor, and to recover, equipment relevant to a range of geophysical and other experiments.

10



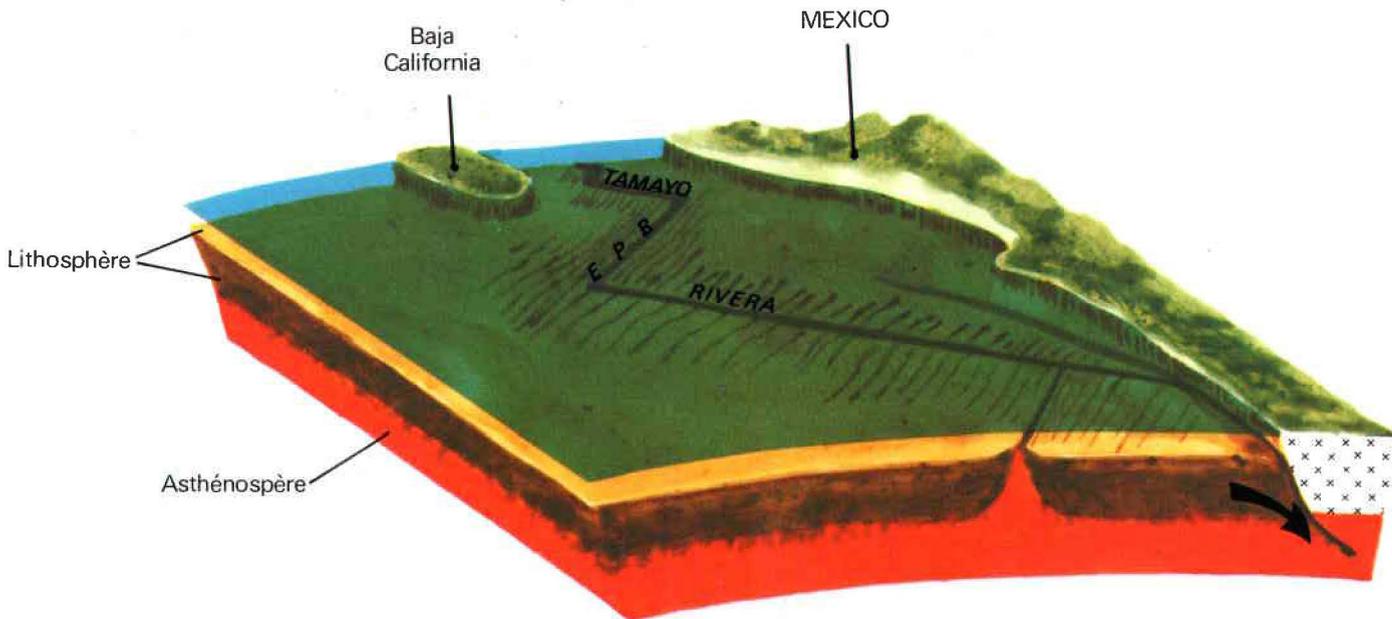
10. Début de plongée. Cyana disparaîtra dès que les flotteurs roses seront enlevés.

Cyana, about to dive, will disappear after the pink floats are removed.



Carte de l'âge du fond de l'Océan, établie à partir des anomalies magnétiques. La dorsale Pacifique est jusqu'à dix fois plus rapide que la dorsale atlantique.

The magnetic anomalies of the sea floor define successive, roughly symmetrical pairs of crustal bands of the same age about the axis of the Mid-Oceanic Ridge. The East Pacific Rise spreads up to ten times as fast as the Mid-Atlantic Ridge.



Bloc diagramme de la Zone Rita.

Simplified view of the oceanic lithosphere (yellow and brown) and underlying asthenosphere (red) in the eastern Pacific. The lithosphere created at the axis of the East Pacific Rise thickens with age and disappears along the Middle America Trench skirting the Mexican borderland.

LA DORSALE MÉDIO-OCÉANIQUE

THE MID-OCEANIC RIDGE

La dorsale médio-océanique a été l'un des derniers grands traits de relief découverts sur notre planète. C'est une immense chaîne de plus de 60 000 kilomètres de long, large de un à deux mille kilomètres et haute de deux à trois mille mètres. Mais son existence était encore insoupçonnée il y a moins d'un siècle. Pour connaître son extension réelle, sa continuité et sa morphologie, il a fallu attendre le moment où l'océanographie moderne a pris son essor après la seconde guerre mondiale. Aujourd'hui encore, cette dorsale reste très inégalement explorée et des secteurs importants n'ont même pas été cartographiés. Il faudra de nombreuses années pour la connaître dans le détail, pour comprendre les mécanismes de sa genèse et surtout pour estimer l'influence de son histoire sur la chimie de l'eau de mer, les variations du niveau marin et les changements globaux du climat.

C'est au milieu du vingtième siècle que l'on a commencé à entrevoir les relations qui existent entre cette dorsale médio-océanique et la dérive des continents. On a alors découvert l'existence d'une dépression à l'axe de certains segments de la chaîne. Par comparaison avec la grande vallée du Rift d'Afrique orientale, qui est un site évident d'extension de la croûte continentale, l'hypothèse a été lancée que l'écartement des continents s'opérait à l'axe des dorsales médio-océaniques.

Par ailleurs, on connaissait l'existence d'une ceinture continue de séismes. Certains coïncidaient avec l'axe des dorsales et l'une des branches s'alignait sur le Rift Africain. Il était logique, encore qu'audacieux à l'époque, de penser que cette ceinture de séismes coïncidait avec la crête continue des dorsales océaniques, et que l'axe de ces dorsales devait être le site privilégié de création du fond des océans. Cette hypothèse était prophétique : l'existence de la dorsale du Chili, entre l'île de Pâques et l'Amérique du Sud a été avancée, avant même que celle-ci ne soit repérée et cartographiée.

Dorsale et tectonique des plaques

Ces premières découvertes s'intègrent maintenant dans la théorie de la tectonique des plaques, remarquable synthèse qui rend compte d'un grand nombre d'observations sur la structure et le fonctionnement de la planète. Au cœur de cette théorie, il y a la notion que la couche rocheuse superficielle de la Terre, la *lithosphère*, épaisse d'une centaine de kilomètres, est constituée par une mosaïque de plaques rigides, en mouvement les unes par rapport aux autres. Les frontières entre les plaques sont des zones très étroites et intensément déformées. Sur ces bordures, la lithosphère peut être créée, détruite ou conservée. Sa partie supérieure, sur une dizaine de kilomètres, forme, sous les océans, la « croûte ».

On peut dire que l'axe de la dorsale marque la trace d'une fissure profonde, à la séparation de deux plaques et une vallée axiale, quand elle existe, la concrétise en surface. Cette fissure plonge en profondeur sous la lithosphère rigide jusqu'à une couche plus chaude et moins résistante, l'*asthénosphère*. Des matériaux en fusion de l'*asthénosphère*, les magmas, montent dans la fissure, se consolident et forment la nouvelle lithosphère. Ce processus est continu, la montée du magma compense constamment la séparation entre les plaques de lithosphère.

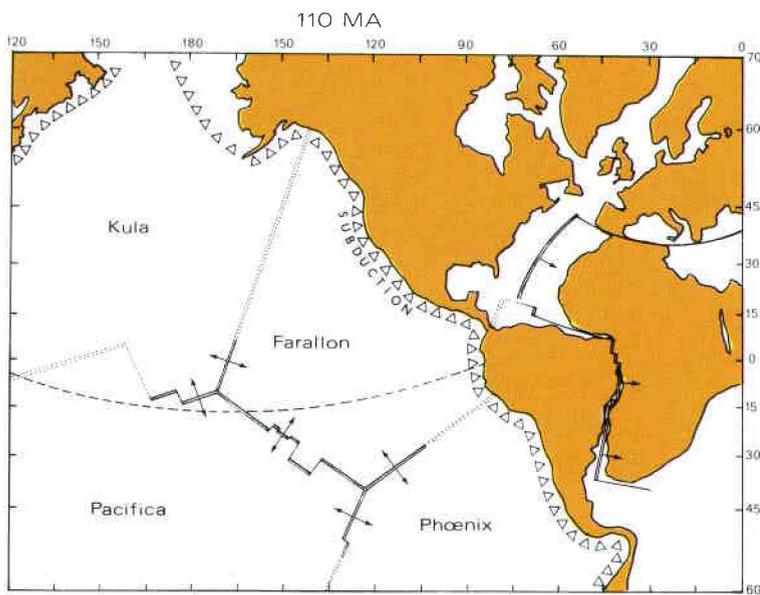
The great, fractured bulge of the sea floor known as the Mid-Oceanic Ridge was the last of the earth's major geographical features to be discovered. Its existence was largely unsuspected little more than a hundred years ago, although the Ridge stretches round the globe for sixty thousand kilometres and is typically one to two thousand kilometres wide and two to three kilometres high. The full extent, continuity and shape of the Ridge were not established until the mid-twentieth century, after World War II, when the period of modern oceanography began. Large features of the Ridge in some parts of the world's oceans are still unmapped. Its finer details, the possible influence of its history on the chemical composition of sea water, on variations of sea level and on climatic change are far from being understood, and the search for the underlying causes of its creation will continue to be an important topic in earth science for many years to come.

Appreciation of the Mid-Oceanic Ridge as a key to understanding how the continents have 'drifted' into their present positions was accelerated by the recognition in the late nineteen-fifties of a prominent rift along parts of the crest of the ridge. By analogy with the Great Rift Valley of East Africa, which was believed to result from tensional stress, the inference was made that the axial zone of the Mid-Oceanic Ridge is a site of sea-floor widening. The presence of an uninterrupted, world-wide belt of 'mid-oceanic' earthquakes extending into East Africa had already been established, and the time was ripe for the logical — although then still bold — proposition that the epicentres coincide with the crest of a continuous, globe-encircling ridge where new ocean floor is being created. The predictive value of the hypothesis was exploited to infer the existence of uncharted segments of the ridge, for example, the Chile Rise between Easter Island and South America.

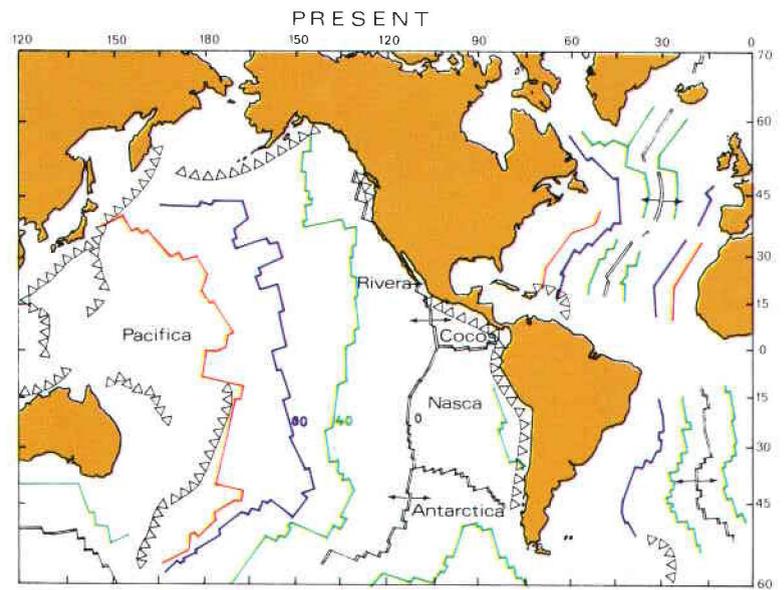
Origin of the Deep-Sea Floor

The early discoveries are now part of the Plate Tectonics hypothesis, a remarkable synthesis which explains many observations about the way the earth works. The central idea of the hypothesis is that the earth is paved with a mosaic of rigid plates, in relative motion and separated by narrow zones of deformation. The plates constitute the rocky outer shell of the earth, or lithosphere, and attain a thickness of perhaps a hundred kilometres. Along the side-boundaries of the plates, lithosphere is either created, conserved or destroyed. Most of the lithosphere is part of the 'Upper Mantle' of the earth. The top part of the lithosphere, down to a depth of about ten kilometres under the ocean floor, is called the 'Crust'.

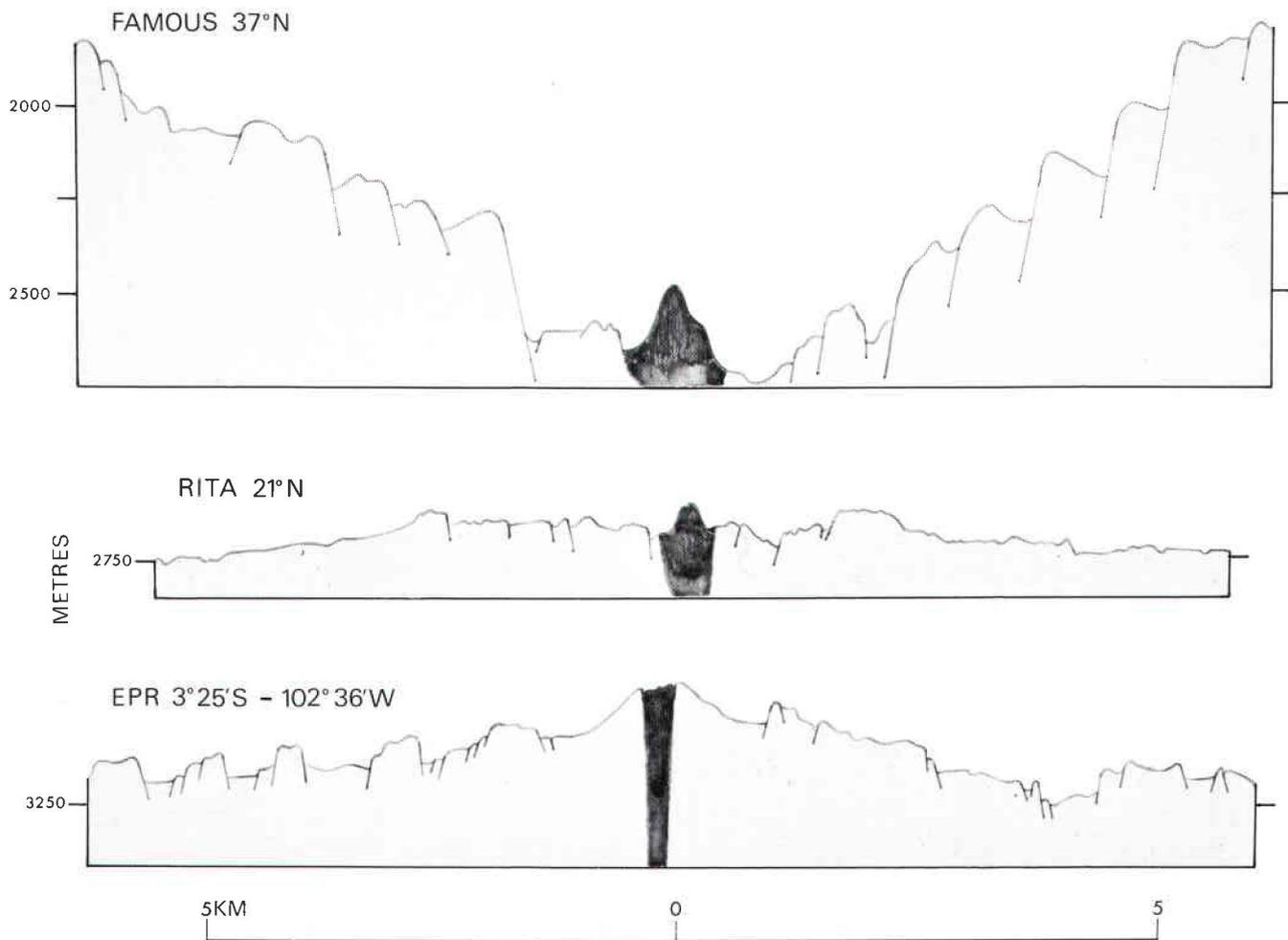
In the simple picture, the axis of the Mid-Oceanic Ridge marks the trace of a deep, tensional crack separating two plates. An axial Rift Valley, where it exists, is merely the superficial expression of the crack, which can be thought of as extending all the way down to the asthenosphere, the hotter, weaker layer lying below the rigid plates. Molten material (magma) exuded from the asthenosphere wells up into the crack, consolidates, and becomes



Evolution du Pacifique entre le Crétacé moyen (110 MA) et le présent. L'océan Pacifique a diminué de surface. Les frontières de plaques ont varié. Des plaques ont disparu (Kula et Phoenix), une autre s'est scindée : Farallon est subdivisée en Rivera, Cocos, Nasca. Le pointillé indique le paléo-équateur illustrant la migration de la plaque Pacifica vers le Nord (3 500 km).



Magnetic anomalies, frozen in the oceanic crust, indicate that, 110 million years ago, the distribution of Mid-Oceanic Ridge segments and the configuration of rigid "plates" in the Pacific Ocean were different. The Pacific has been shrinking steadily ; the Kula and Phoenix Plates have been subducted beneath the North American and South American Plates ; the Farallon Plate is now reorganized as the Rivera, Cocos and Nasca Plates.



Coupes comparées de la dorsale océanique. Net contraste entre une dorsale lente, Famous, à vallée axiale bien marquée et les dorsales à expansion moyenne ou rapide qui en sont dépourvues.

Structural profiles across the crest of the Mid-Oceanic Ridge in different parts of the ocean show the contrast between a slow-spreading, rifted part of the Mid-Oceanic Ridge (top) and faster-growing segments with no well developed Rift Valley.

Diagramme de fréquence des taux d'ouverture actuels pour la dorsale. Les dorsales rapides sont connues dans l'Océan Indien et dans le Pacifique, au nord de l'Equateur. Les plus rapides se situent entre l'île de Paques et l'Equateur.

The oceans grow out from the axis of the Mid-Oceanic Ridge at different rates. The photographs in this Atlas were taken on a segment of the Ridge which has grown laterally at about 6 centimetres per annum. Faster segments are found further south along the East Pacific Rise and in the Indian Ocean. Super-fast segments occur only in the central and southern part of the Rise between the Equator and Easter Island.

inversions, des pôles magnétiques de la terre. On peut établir l'âge d'une série d'inversions en la comparant à une série analogue enregistrée dans des échantillons de roches continentales ou de sédiments océaniques susceptibles d'être datés. Pour obtenir ces âges, on peut utiliser, soit les méthodes de la géochronologie absolue, qui utilisent le taux de désintégration des noyaux radioactifs, soit les outils de la stratigraphie et de la paléontologie. La chronologie des inversions magnétiques est maintenant connue dans ses grandes lignes, du moins pour les cent derniers millions d'années. Le dernier changement important dans la polarité du champ magnétique terrestre a eu lieu il y a environ 700 000 ans. La période de champ normal dans laquelle nous vivons s'appelle l'Epoque Magnétique de Brunhes. La période précédente, avec un champ inverse, est l'Epoque Matuyama. Si l'on mesure la largeur de la croûte océanique formée pendant une ou plusieurs époques magnétiques dans les divers océans du globe, on s'aperçoit que les taux moyens de croissance des océans varient de un à vingt centimètres par an.

La forme des anomalies magnétiques permet de déduire, de manière indirecte, quelle est la largeur de la zone d'extrusion axiale dans laquelle la majeure partie de la nouvelle croûte océanique est mise en place. On arrive à un chiffre de quelques kilomètres seulement, quel que soit le taux de renouvellement des fonds océaniques. Pourtant, la morphologie de la zone axiale des dorsales est très différente entre les secteurs lents et les secteurs plus rapides. Ainsi, la présence d'une vallée axiale bien marquée, avec une largeur d'environ trente-cinq kilomètres et une profondeur avoisinant deux kilomètres, ne s'observe qu'au droit des dorsales lentes, dont le taux moyen d'ouverture est de deux à quatre centimètres par an. Le long des dorsales rapides, où la vitesse de séparation entre les plaques est supérieure à cinq centimètres par an, la vallée axiale est, soit une structure mineure ou mal définie, soit absente.

La présence ou l'absence d'une grande vallée à l'axe de la dorsale est probablement liée à des différences dans la structure profonde, par exemple à la géométrie des réservoirs magmatiques sous la dorsale, et au caractère discontinu ou permanent de leur fonctionnement. Par ailleurs, il est fort possible que les quantités de certains éléments chimiques, fournis à l'eau de mer par le processus d'accrétion des dorsales, dépendent de la vitesse moyenne de création des fonds océaniques. La notion de taux d'ouverture le long des dorsales fournit donc un guide précieux pour conduire l'exploration des dorsales et pour proposer des modèles qui expliquent la création de la lithosphère océanique et le bilan chimique global de l'eau de mer. Il s'avère donc nécessaire d'examiner les secteurs les plus représentatifs de la gamme des taux d'ouverture, afin d'aboutir à une bonne connaissance de la dorsale.

Ces quelques idées essentielles ont été établies vers la fin des années soixante. Depuis, l'étude des dorsales s'est développée suivant deux voies d'approche complémentaires. La voie théorique d'une part, qui cherche à modéliser les phénomènes qui se déroulent dans le manteau profond. D'autre part, les études détaillées de la zone axiale, qui cherchent, par des observations réelles sur le terrain, à vérifier les principes généraux de l'expansion des fonds océaniques, à examiner la signification des différences structurales qui apparaissent le long des dorsales, et à évaluer l'importance d'une circulation et d'un réchauffement de l'eau de mer dans la croûte océanique. L'essentiel de ces études s'est effectué sur des navires utilisant, depuis la surface, divers instruments de mesure ou de prélèvement : sondes, caméras, dragues... Depuis sept ans, des submersibles habités ont été utilisés sur la dorsale pour aborder des problèmes qui ne peuvent être résolus, dans l'état actuel des techniques, que par la présence de l'homme. Seul l'observateur scientifique, sur le terrain, peut faire des observations directes au fond des océans à une échelle compatible avec celle des phénomènes, c'est-à-dire à l'échelle

from about one centimetre per year to more than fifteen centimetres per year.

The width of the zone within which most of the new crust is emplaced is inferred indirectly from the shapes of magnetic anomalies to be a matter of less than a few, or several kilometres. On present evidence it appears to be independent of the mean spreading rate. However, the morphology of the crestal area of the Mid-Oceanic Ridge is not the same on slower and faster spreading segments. Notably, a well-developed rift valley, about thirty-five kilometres wide and two kilometres deep, is found only along Ridge segments where the average opening rate is about two to four centimetres each year. Along parts of the Ridge where the plate-separation rate is greater than about five centimetres per year, the Rift Valley is either shallow and ill defined or does not exist. It seems likely that the presence or absence of a large rift valley is coupled to differences in deeper phenomena, such as the geometry of magma reservoirs and the extent to which these function as productive, steady-state systems. Furthermore, it is quite possible that the amounts of certain chemical elements delivered into the oceanic realm during the accretion process are a function of the average rate of sea-floor growth. The notion of varying opening rates along the Mid-Oceanic Ridge is a useful one for guiding exploration of the Ridge and for working out hypotheses to explain the creation of lithosphere; and it may be helpful in studies concerned with the chemical budget of ocean waters. Indeed, the recognition of important variations along the Ridge implies the necessity of examining Ridge areas representing several parts of the spectrum of rates of growth in order to understand the Ridge as a whole.

Fine-scale studies

By the late nineteen-sixties many of the basic ideas we have today about the Mid-Oceanic Ridge were well established. Interest then began to turn to theoretical modelling of deep-seated mantle phenomena, to detailed exploration of the Ridge crest with a view to testing ideas by ground-truth observation, and to studies of the possibility of massive circulation and heating up of sea water in the oceanic crust. Almost all the field work on the Ridge has been accomplished from surface ships, using cameras and sea-floor sampling equipment suspended on wires, and on-board and towed geophysical instruments. During the past seven years, manned submersibles have been used on the Ridge to tackle problems that cannot, at the present time, be resolved by any other means. Most particularly, by going to the bottom of the sea man can make direct observations at the scale appropriate to important, small features of the ocean floor, that is, at the scale of meters and tens of metres, he can take photographs and samples of small, specific targets and, most important of all, he can identify problems of interest and make direct, first-hand decisions about how they might be solved. Techniques for making geophysical measurements from submersibles are being developed as a complement to geological work and some of these techniques have already been applied.

The first big step towards fine-scale investigation of the Mid-Oceanic Ridge by submersibles was the ambitious French-American Mid-Ocean Undersea Study (Famous), which was aimed at exploring the axial zone of a segment of the Ridge in the Atlantic Ocean to the west and south of the Azores. The average rate of sea-floor growth there is about two centimetres per year, and there is a deep rift valley. The overall results of the study, which included diving expeditions in 1973 and 1974 as well as a good deal of work conducted from surface ships, have led to the

La croissance d'un océan met en jeu non seulement des épanchements ou extrusions volcaniques et des intrusions du magma qui n'atteint jamais la surface et cristallise lentement en profondeur, mais aussi une intense activité tectonique. Les structures tectoniques visibles à la crête de la dorsale sont des fissures ouvertes et des escarpements très raides, les failles normales, qui représentent des cassures du fond de l'océan. Failles et fissures, parallèles à l'axe de la dorsale, sont la conséquence de l'extension.

La dorsale est découpée en segments décalés latéralement les uns par rapport aux autres. La croissance d'un océan implique donc aussi le frottement ou le cisaillement des plaques les unes contre les autres. Les frontières en cisaillement, le long desquelles la lithosphère est conservée, sont à peu près perpendiculaires à la crête des dorsales et sont marquées en surface par des vallées profondes, que l'on appelle zones de fracture ou, si elles sont actives, failles transformantes. La relaxation de l'énergie, qui accompagne l'écartement ou le cisaillement des plaques, se reflète dans les tremblements de terre qui ont lieu chaque jour le long de la dorsale, et dans les centaines de séismes importants enregistrés au cours des quatre-vingt dernières années.

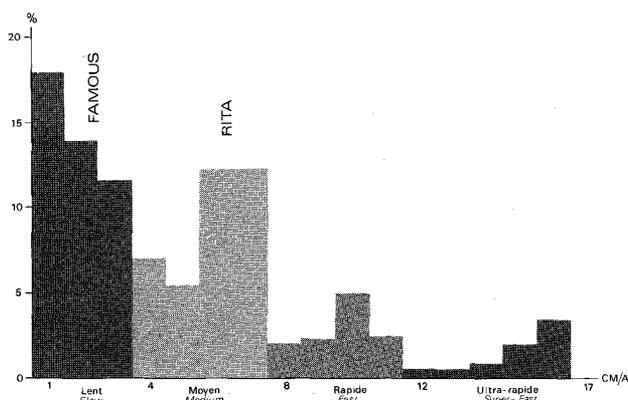
La température moyenne de la lithosphère est plus élevée près de l'axe de la dorsale, où le flux de chaleur est anormalement fort. Température et flux diminuent avec l'âge de la croûte océanique et donc en fonction de la distance à la crête de la dorsale. A l'endroit où la lithosphère est la plus chaude, elle est aussi la moins dense, et elle « flotte » relativement haut sur l'asthénosphère plastique. En se refroidissant, la lithosphère s'épaissit et le fond océanique s'approfondit. Un océan est en perpétuelle évolution : qu'il s'agrandisse ou qu'il se rétrécisse, la dorsale maintient une activité dont les processus dynamiques essentiels sont la croissance à l'axe et la subsidence sur les flancs. Celle-ci se fait sans rupture et consiste en un enfoncement progressif du plancher océanique par de lents mouvements verticaux, accompagnés d'un enfouissement sous une couverture de sédiments qui tombent en pluie continue sur le fond océanique.

En définitive, c'est seulement le long d'une bande étroite, à l'axe de la dorsale, que se manifestent les phénomènes actifs et spectaculaires de la croissance du fond des océans, ou accréation, et que se tisse la trame du socle océanique.

Dorsales lentes, dorsales rapides

On pourrait assimiler la dorsale médio-océanique à une seule entité. En fait ses divers éléments évoluent à des taux différents. Les taux moyens de croissance sont déduits de l'analyse des anomalies magnétiques qui ont leur source dans la croûte terrestre et que l'on enregistre en mer à l'aide de magnétomètres remorqués.

Les enregistrements magnétiques ainsi recueillis à travers un océan démontrent qu'il y a eu plusieurs retournements, ou



new lithosphere. The process is continuous in the sense that the upwelling of magma roughly keeps pace with plate separation. The growth of an ocean thus involves not only volcanic eruptions and crystallization at depth of magma that never reaches the surface, but also tectonic activity. In the case of the Ridge crest, the visible tectonic structures are open fissures and steep scarps or walls representing breaks in the sea floor called normal faults. The faults and fissures are consequences of the tugging apart of the sea floor. Because the Ridge crest is broken into laterally 'offset' segments, the growth of an ocean also involves the sliding or shearing against each other of adjacent plates. The lines of shear, plate boundaries along which lithosphere is conserved, lie at approximately right angles to the Ridge crest and are associated with deep valleys known as fracture zones or, if tectonically active, as transform faults. The release of energy that accompanies the rifting and shearing is reflected in hundreds of earth tremors every day, and in the hundreds of large earthquakes recorded during the past eighty years or so of modern seismology.

The average temperature of the lithosphere is greatest close to the axis of the Mid-Oceanic Ridge, where the rate of upward flow of heat is abnormally high, and it decreases with age and increasing distance from the Ridge crest. Where the lithosphere is hottest, it is least dense, and therefore 'floats' relatively high on the weak asthenosphere. As the lithosphere cools, the isotherm corresponding to its lower boundary deepens and the sea floor subsides. Within a pattern of expanding and shrinking oceans, the Ridge, then, is maintained as a persistent feature in a dynamic and not static way, by growth at its axis and by subsidence of its flanks. The subsidence does not involve significant faulting ; it is accomplished imperceptibly by slow, vertical movements, and is accompanied by burial of the rocky outcrops of the Ridge under an increasingly thick blanket of the various sediments that rain down constantly through the ocean. It is therefore only along a narrow ribbon of sea floor at the crest of the Mid-Oceanic Ridge where the most spectacular, active phenomena of ocean floor growth are manifest, and where the bedrock fabric of the greater part of the deep sea floor is woven.

Growth-rates of Oceans

Although the Mid-Oceanic Ridge can be thought of as a single structural entity produced as a consequence of sea-floor growth, different parts of the Ridge grow at different rates. The average rates can be estimated from an analysis of the magnetic anomalies of the earth's crust that have been recorded at sea using a towed magnetometer. Records taken across an ocean show that there *have* been numerous flips, or reversals, of the north and south magnetic poles. We can determine the age of a sequence of reversals by reference to a corresponding sequence recorded in datable samples of continental rocks or oceanic sediments. The samples are dated by measuring their relative contents of certain radioactive isotopes, or by relating the samples to fossil-bearing sequences of known age. The magnetic chronology so obtained is more or less well established for the past hundred million years or so. The last major reversal of the polarity of the earth's magnetic field took place about 700 000 years ago. The period since then is called the Brunhes Magnetic Epoch ; the preceding period is the Matuyama Epoch. From measurements of the widths of crust produced during one, or several, of the different magnetic epochs in different oceans, it appears that average rates of sea-floor opening and growth vary

inversions, des pôles magnétiques de la terre. On peut établir l'âge d'une série d'inversions en la comparant à une série analogue enregistrée dans des échantillons de roches continentales ou de sédiments océaniques susceptibles d'être datés. Pour obtenir ces âges, on peut utiliser, soit les méthodes de la géochronologie absolue, qui utilisent le taux de désintégration des noyaux radioactifs, soit les outils de la stratigraphie et de la paléontologie. La chronologie des inversions magnétiques est maintenant connue dans ses grandes lignes, du moins pour les cent derniers millions d'années. Le dernier changement important dans la polarité du champ magnétique terrestre a eu lieu il y a environ 700 000 ans. La période de champ normal dans laquelle nous vivons s'appelle l'Epoque Magnétique de Brunhes. La période précédente, avec un champ inverse, est l'Epoque Matuyama. Si l'on mesure la largeur de la croûte océanique formée pendant une ou plusieurs époques magnétiques dans les divers océans du globe, on s'aperçoit que les taux moyens de croissance des océans varient de un à vingt centimètres par an.

La forme des anomalies magnétiques permet de déduire, de manière indirecte, quelle est la largeur de la zone d'extrusion axiale dans laquelle la majeure partie de la nouvelle croûte océanique est mise en place. On arrive à un chiffre de quelques kilomètres seulement, quel que soit le taux de renouvellement des fonds océaniques. Pourtant, la morphologie de la zone axiale des dorsales est très différente entre les secteurs lents et les secteurs plus rapides. Ainsi, la présence d'une vallée axiale bien marquée, avec une largeur d'environ trente-cinq kilomètres et une profondeur avoisinant deux kilomètres, ne s'observe qu'au droit des dorsales lentes, dont le taux moyen d'ouverture est de deux à quatre centimètres par an. Le long des dorsales rapides, où la vitesse de séparation entre les plaques est supérieure à cinq centimètres par an, la vallée axiale est, soit une structure mineure ou mal définie, soit absente.

La présence ou l'absence d'une grande vallée à l'axe de la dorsale est probablement liée à des différences dans la structure profonde, par exemple à la géométrie des réservoirs magmatiques sous la dorsale, et au caractère discontinu ou permanent de leur fonctionnement. Par ailleurs, il est fort possible que les quantités de certains éléments chimiques, fournis à l'eau de mer par le processus d'accrétion des dorsales, dépendent de la vitesse moyenne de création des fonds océaniques. La notion de taux d'ouverture le long des dorsales fournit donc un guide précieux pour conduire l'exploration des dorsales et pour proposer des modèles qui expliquent la création de la lithosphère océanique et le bilan chimique global de l'eau de mer. Il s'avère donc nécessaire d'examiner les secteurs les plus représentatifs de la gamme des taux d'ouverture, afin d'aboutir à une bonne connaissance de la dorsale.

Ces quelques idées essentielles ont été établies vers la fin des années soixante. Depuis, l'étude des dorsales s'est développée suivant deux voies d'approche complémentaires. La voie théorique d'une part, qui cherche à modéliser les phénomènes qui se déroulent dans le manteau profond. D'autre part, les études détaillées de la zone axiale, qui cherchent, par des observations réelles sur le terrain, à vérifier les principes généraux de l'expansion des fonds océaniques, à examiner la signification des différences structurales qui apparaissent le long des dorsales, et à évaluer l'importance d'une circulation et d'un réchauffement de l'eau de mer dans la croûte océanique. L'essentiel de ces études s'est effectué sur des navires utilisant, depuis la surface, divers instruments de mesure ou de prélèvement : sondes, caméras, dragues... Depuis sept ans, des submersibles habités ont été utilisés sur la dorsale pour aborder des problèmes qui ne peuvent être résolus, dans l'état actuel des techniques, que par la présence de l'homme. Seul l'observateur scientifique, sur le terrain, peut faire des observations directes au fond des océans à une échelle compatible avec celle des phénomènes, c'est-à-dire à l'échelle

from about one centimetre per year to more than fifteen centimetres per year.

The width of the zone within which most of the new crust is emplaced is inferred indirectly from the shapes of magnetic anomalies to be a matter of less than a few, or several kilometres. On present evidence it appears to be independent of the mean spreading rate. However, the morphology of the crestal area of the Mid-Oceanic Ridge is not the same on slower and faster spreading segments. Notably, a well-developed rift valley, about thirty-five kilometres wide and two kilometres deep, is found only along Ridge segments where the average opening rate is about two to four centimetres each year. Along parts of the Ridge where the plate-separation rate is greater than about five centimetres per year, the Rift Valley is either shallow and ill defined or does not exist. It seems likely that the presence or absence of a large rift valley is coupled to differences in deeper phenomena, such as the geometry of magma reservoirs and the extent to which these function as productive, steady-state systems. Furthermore, it is quite possible that the amounts of certain chemical elements delivered into the oceanic realm during the accretion process are a function of the average rate of sea-floor growth. The notion of varying opening rates along the Mid-Oceanic Ridge is a useful one for guiding exploration of the Ridge and for working out hypotheses to explain the creation of lithosphere; and it may be helpful in studies concerned with the chemical budget of ocean waters. Indeed, the recognition of important variations along the Ridge implies the necessity of examining Ridge areas representing several parts of the spectrum of rates of growth in order to understand the Ridge as a whole.

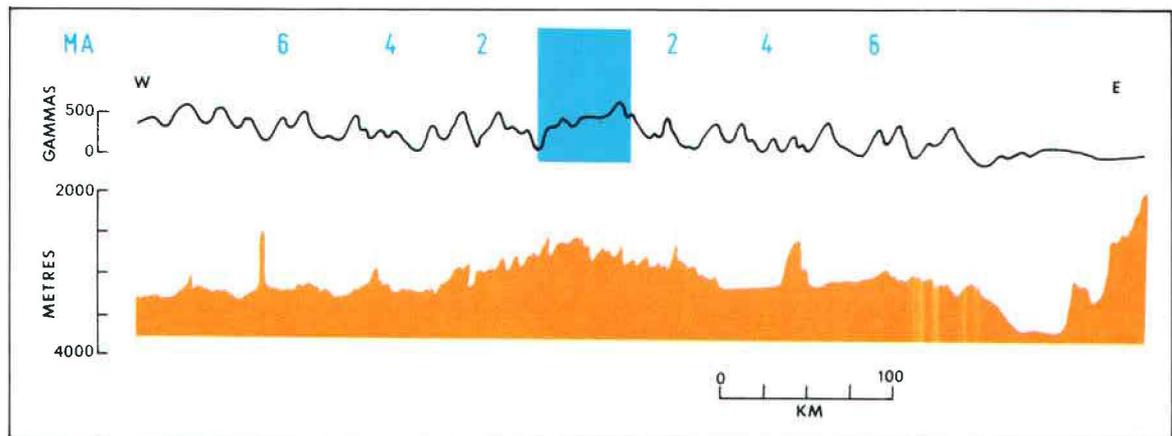
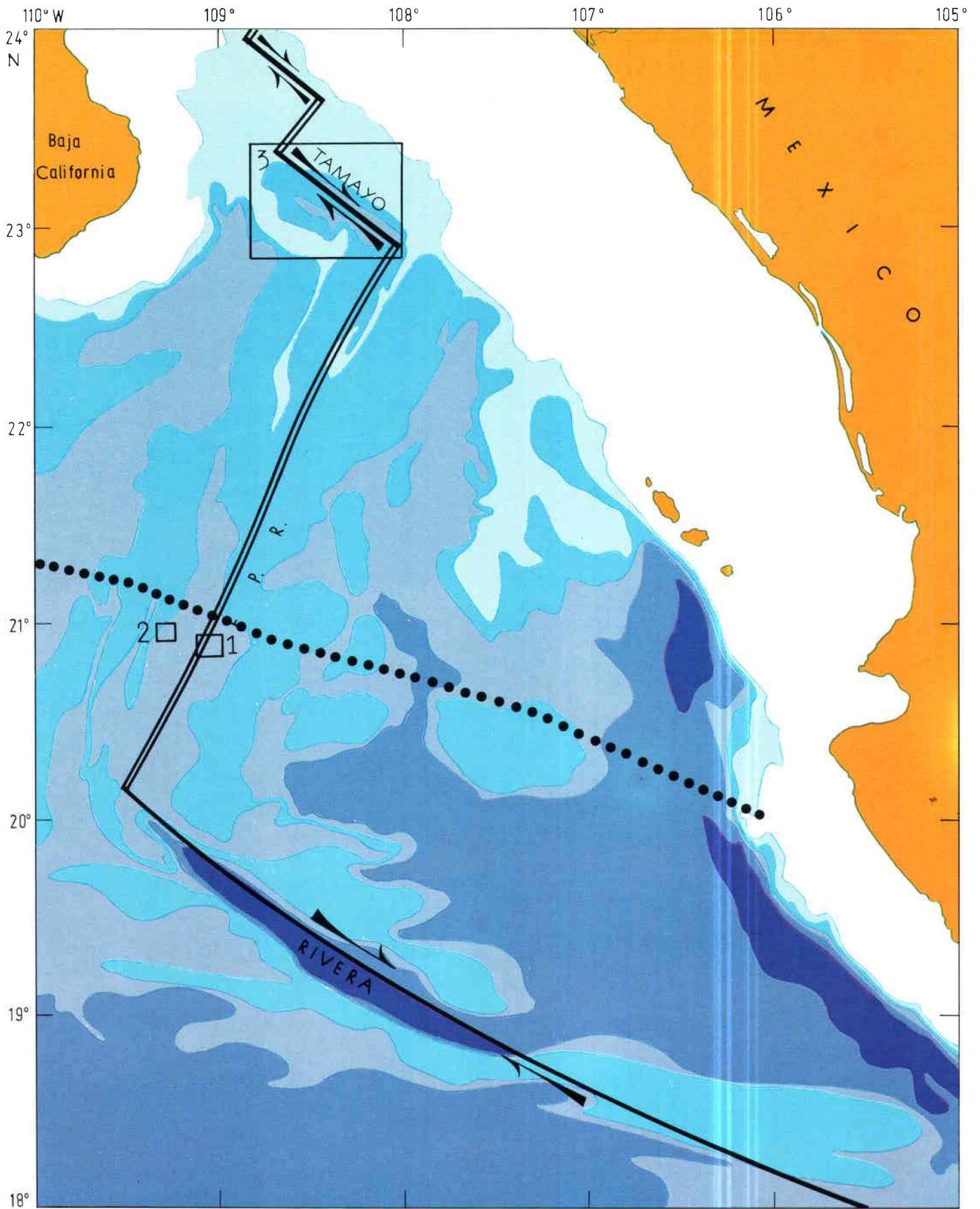
Fine-scale studies

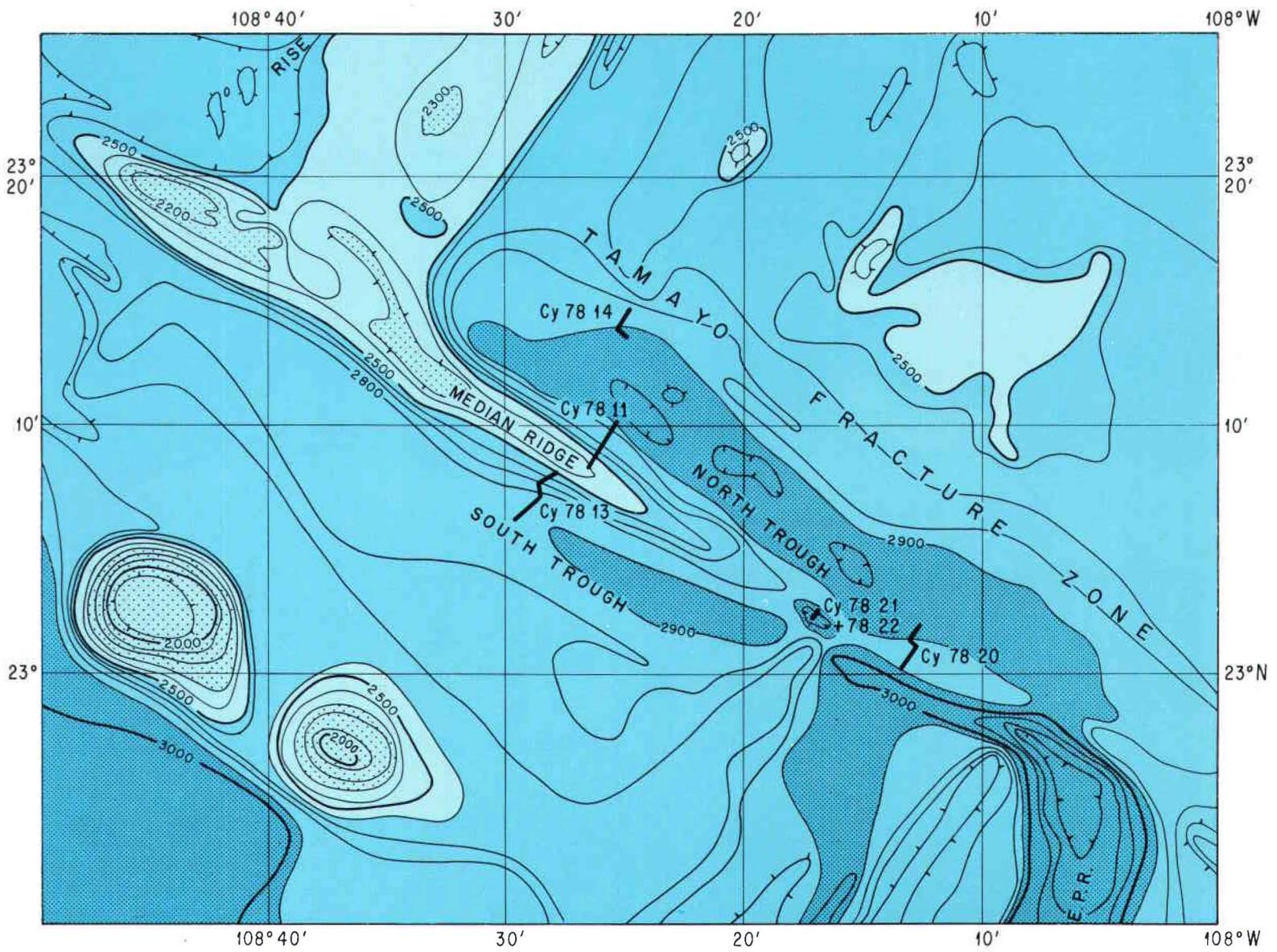
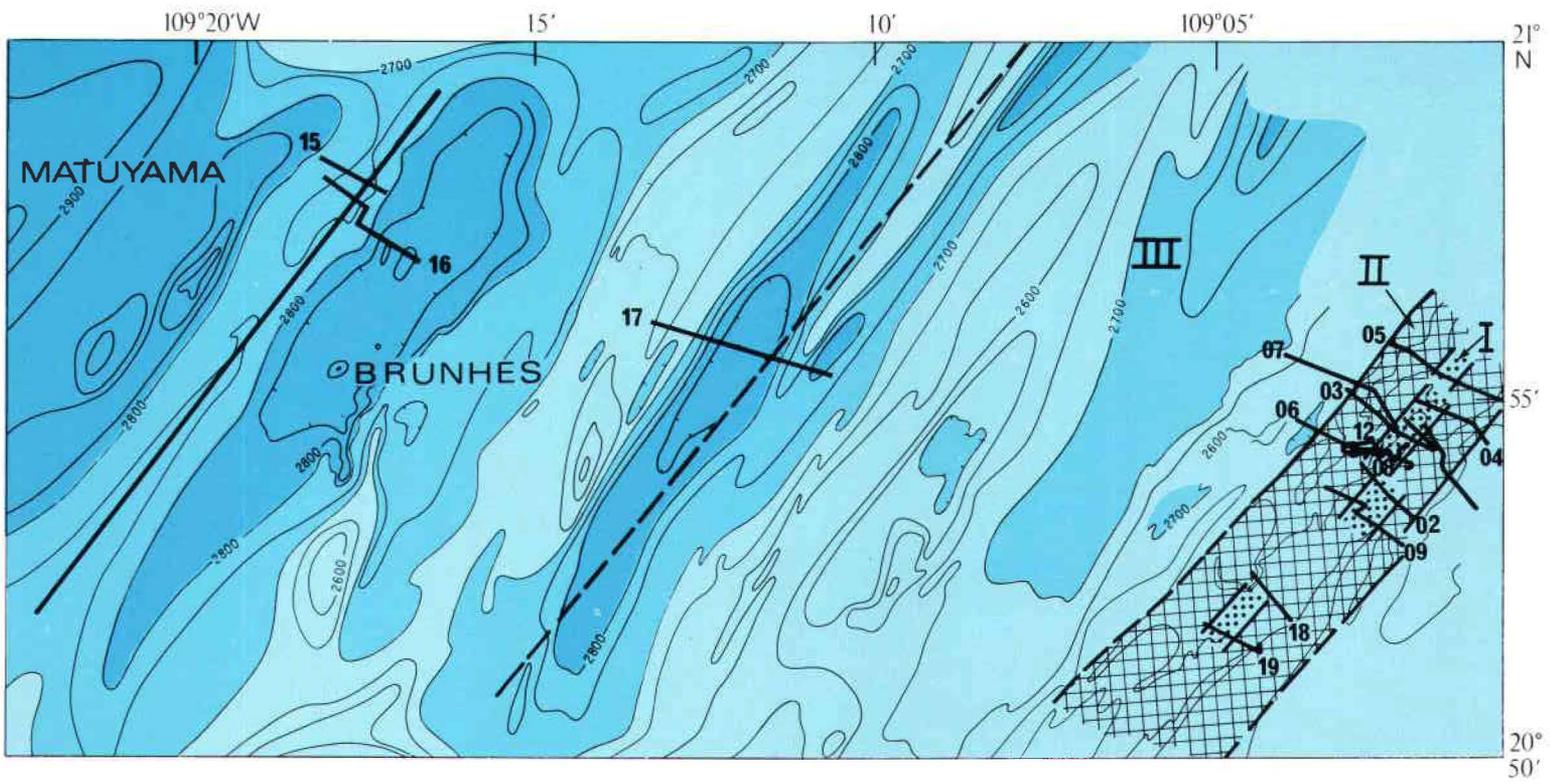
By the late nineteen-sixties many of the basic ideas we have today about the Mid-Oceanic Ridge were well established. Interest then began to turn to theoretical modelling of deep-seated mantle phenomena, to detailed exploration of the Ridge crest with a view to testing ideas by ground-truth observation, and to studies of the possibility of massive circulation and heating up of sea water in the oceanic crust. Almost all the field work on the Ridge has been accomplished from surface ships, using cameras and sea-floor sampling equipment suspended on wires, and on-board and towed geophysical instruments. During the past seven years, manned submersibles have been used on the Ridge to tackle problems that cannot, at the present time, be resolved by any other means. Most particularly, by going to the bottom of the sea man can make direct observations at the scale appropriate to important, small features of the ocean floor, that is, at the scale of meters and tens of metres, he can take photographs and samples of small, specific targets and, most important of all, he can identify problems of interest and make direct, first-hand decisions about how they might be solved. Techniques for making geophysical measurements from submersibles are being developed as a complement to geological work and some of these techniques have already been applied.

The first big step towards fine-scale investigation of the Mid-Oceanic Ridge by submersibles was the ambitious French-American Mid-Ocean Undersea Study (Famous), which was aimed at exploring the axial zone of a segment of the Ridge in the Atlantic Ocean to the west and south of the Azores. The average rate of sea-floor growth there is about two centimetres per year, and there is a deep rift valley. The overall results of the study, which included diving expeditions in 1973 and 1974 as well as a good deal of work conducted from surface ships, have led to the

Zone Rita. Les plongées ont été réalisées sur trois zones (carrés 1, 2, 3). La plupart des photos ont été prises dans les zones 1 et 2. La ligne en pointillés correspond aux profils bathymétrique et magnétique dans la figure de dessous. En bas, on remarque le bombement de la dorsale lié à un flux de chaleur élevé. Le rectangle bleu indique l'apport de croûte au cours des 700 000 dernières années (époque Brunhes).

Almost all the photographs in this Atlas were taken within, or between, the small areas 1 and 2 near 21° N. A few come from area 3 to the north where the crest of the East Pacific Rise is displaced laterally along the Tamayo Fracture Zone. The dotted line shows the track corresponding to the bathymetric and magnetic profiles shown in the illustration below. The upper profile shows the residual magnetic anomalies used to date the sea floor (top scale, in millions of years). The shaded blue area represents crust created during the past 700 000 years.





Bathymétrie de la zone Cyamex et localisation des plongées.

Dive tracks of Cyana shown on a bathymetric map.

du mètre ou de la dizaine de mètres, prendre des photographies, choisir des échantillons, et surtout identifier les problèmes et prendre des décisions immédiates sur la meilleure manière de les résoudre. Les plongées habitées ouvrent aussi la voie à des expériences géophysiques ou géochimiques précises, conduites sur le fond.

De « Famous » à « Cyamex »

L'expédition FAMOUS (French-American Mid-Ocean Undersea Study), en 1973 et 1974, a été la première grande étape de l'exploration détaillée par submersible de la dorsale médio-océanique. Ce projet a été consacré, dans l'océan Atlantique, à l'étude de la zone axiale d'un de ses segments, au sud-ouest de l'archipel des Açores. Le taux moyen de croissance de la croûte océanique est ici de deux centimètres par an, et la zone axiale est entaillée par une profonde vallée. Les résultats d'ensemble de l'expédition ont permis d'aboutir à la connaissance, la plus complète à ce jour, de la géologie d'une dorsale lente et d'une faille transformante associée. Après FAMOUS, les Etats-Unis ont poursuivi ces études par submersible, d'abord sur la dorsale lente de la fosse Cayman dans la mer des Caraïbes, ensuite sur la dorsale à taux d'expansion moyen des Galapagos, rameau de la dorsale du Pacifique oriental entre les plaques Nazca et Cocos. Tout désignait la dorsale du Pacifique Est, dont le taux d'expansion varie entre six et dix-huit centimètres par an, comme prochaine cible scientifique.

La région de la dorsale du Pacifique Est, choisie comme première zone pour des plongées, se situe au large des côtes mexicaines à 21° N, à proximité du Tropique du Cancer. Ce premier objectif a été choisi pour des impératifs logistiques et aussi parce que certaines zones de la région avaient déjà été étudiées en détail. Depuis quatre millions d'années, le plancher océanique au large du Mexique, entre les plaques Amérique du Nord et Pacifique, croît en moyenne d'environ six centimètres par an. Ce taux s'inscrit au bas de la gamme des taux d'ouverture de la dorsale du Pacifique-Est. Mais il est, à l'égal de celui des Galapagos, trois fois plus rapide que le taux de la dorsale médio-Atlantique. L'expédition Cyamex, au début de l'année 1978, a constitué la première phase des plongées. Un des objectifs majeurs de l'expédition était d'examiner la géologie associée à la création et à l'évolution précoce de la croûte océanique. C'est pourquoi la plupart des plongées ont eu lieu sur la zone axiale. Le point précis choisi pour ces études, à 21° N, est situé sur le dernier tronçon bien défini de la dorsale du Pacifique Est, avant qu'elle ne pénètre dans le Golfe de Californie, entre les zones de fracture Rivera et Tamayo. Plus au Nord, la frontière des plaques est représentée par le système de failles de San Andreas, qui lacère la Californie de Salton Sea à San Francisco et provoque des tremblements de terre périodiques. La crête de la dorsale à 21° Nord est marquée par un bombement axial de cinq kilomètres de large, échancré par une vallée peu profonde. Ce bloc, formé de laves de moins de 100 000 ans, est situé par 2 600 mètres de fond. La croûte la plus jeune occupe une bande étroite à peu près à l'axe de la vallée. La faille transformante Tamayo, plus au Nord, et une région du flanc ouest de la dorsale, où l'inversion de polarité magnétique Brunhes-Matuyama est enregistrée dans la croûte océanique, ont également fait l'objet de reconnaissances préliminaires.

Dans cet atlas, voici d'abord les images caractéristiques de l'océan à sa naissance, quand les coulées volcaniques dans leur état premier s'épanchent à l'axe de la dorsale. Nous nous écarterons ensuite vers les régions où le chaos tourmenté de la crête s'apaise en un paysage où les failles meurent et les reliefs s'estompent sous les sédiments. Les dernières images feront partager au lecteur l'émerveillement des plongeurs devant le spectacle inattendu, sur les basaltes stériles, de sources métallifères et d'oasis de vie réunis dans une étonnante symbiose minérale et organique.

most thorough view we have of the geology of a slow-spreading Ridge segment and of an associated transform fault. After Famous, the United States carried out studies by submersible on the Mid-Cayman Rise, an atypically situated, slowly accreting plate boundary in the Caribbean, and on the short, moderately fast-spreading Galapagos Rise, the offshoot of the East Pacific Rise that separates the Nazca and Cocos Plates. The stage had now been set for an attack by submersibles on the huge East Pacific Rise itself, which offers a range of opening rates from six to eighteen centimetres per year.

The region of the East Pacific Rise that was chosen as the first target for the dives lies off the coast of Mexico, just south of the Tropic of Cancer near 21 degrees North latitude. The choice was made partly for logistical reasons and partly because some areas within this region had been previously studied from surface ships. The sea floor off Mexico has been growing between the Pacific and North American Plates at about six centimetres per year during the past four million years or so. The opening rate, about the same as that associated with the Galapagos Rise, is thus at the low end of the spectrum for the East Pacific Rise as a whole. Nevertheless it is about three times as fast as the opening rate in the North Atlantic. The first phase of the submersible operations was the expedition Cyamex in early 1978, which made use of maps prepared by United States' scientists from data gathered by instruments towed near the sea floor. The principal interest of the expedition was to examine the geological effects of the addition and very early evolution of new crust. Most of the dives were therefore concentrated on the northeast-trending crestal zone of the Rise. The particular segment selected for study at 21 degrees North is situated between the Rivera and Tamayo Fracture Zones, on the last well-defined segment of the East Pacific Rise before it enters the Gulf of California. Further north, the plate boundary is represented by the San Andreas Fault system which cuts through California from the Salton Sea to San Francisco and which is notorious because of the recurrent earthquakes that it provokes. The crest of the Rise at 21 degrees North is marked by a shallow valley within an axial bulge about five kilometres wide, and about 2600 metres deep. The very newest crust occupies a narrow, more or less central band within this valley. Two secondary study areas were the moderately fast-slipping Tamayo Transform Fault to the north, and an area on the western flank of the Rise where the Brunhes-Matuyama magnetic polarity reversal is recorded in the crustal rocks.

In this book we focus first on some of the outstanding features of the virginal sea floor at the site of its creation, where the shape and character of volcanic flows can best be studied. We then illustrate aspects of immediately adjacent, slightly older zones at the crest of the Rise. Here we see a rapid evolution of the young crust under the impact of the prevailing extensional forces. A little further out, the spectacular landscape of the crest gives way gradually to the tectonically quiet, sediment-covered flanks of the Rise. Finally, we return to the younger regions to illustrate the discovery there of ore-grade, metalliferous sulphide accumulations, the first such deposits to have been found in the oceans. The sulphides are of hydrothermal origin, being the result of deposition of precipitates from heated-up sea water that has circulated through a labyrinth of deep cracks in the crust. Close to the axis of the Rise we also found a funeral field of giant clams, a testimony of an oasis that once existed around a site of exhalation of hot water. The book ends with a few photographs from the RISE expedition a year after Cyamex that show colonies of unusual benthic fauna and the first observed deep-sea eruption of metalliferous springs.



GENESE DU FOND DES OCÉANS

CREATION OF NEW OCEAN FLOOR

Le fond du Pacifique naît au cœur de la dorsale, dans une zone de largeur insignifiante par rapport à l'étendue de l'immense océan. C'est à partir de cette entaille étroite que s'est développée la plus grande partie de cet océan, entre l'Asie et l'Amérique. C'est à la crête de la dorsale du Pacifique Est que la nouvelle croûte océanique se crée, et que les coulées basaltiques juvéniles forment les traits majeurs du relief sous-marin.

The floor of the Pacific has been created within a zone of insignificant width compared with the size of the ocean. Out of this narrow strip of sea floor no wider than a kilometre or two, and in less than 150 million years, has grown the greater part of the whole spread of the Pacific between the Americas and Asia. At the crest of the East Pacific Rise, where the new crust is formed, fresh lavas build all of the dominant structures.

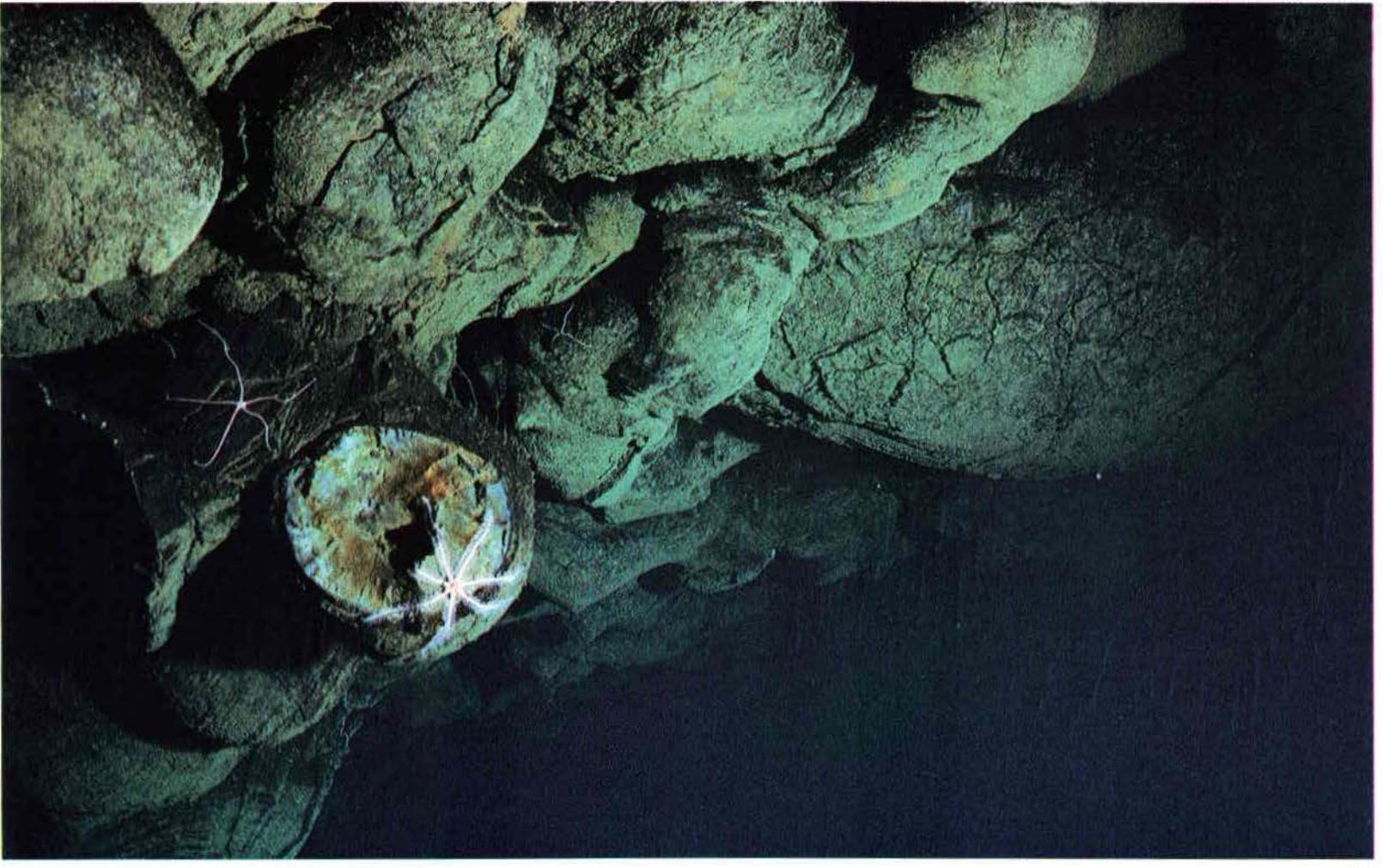
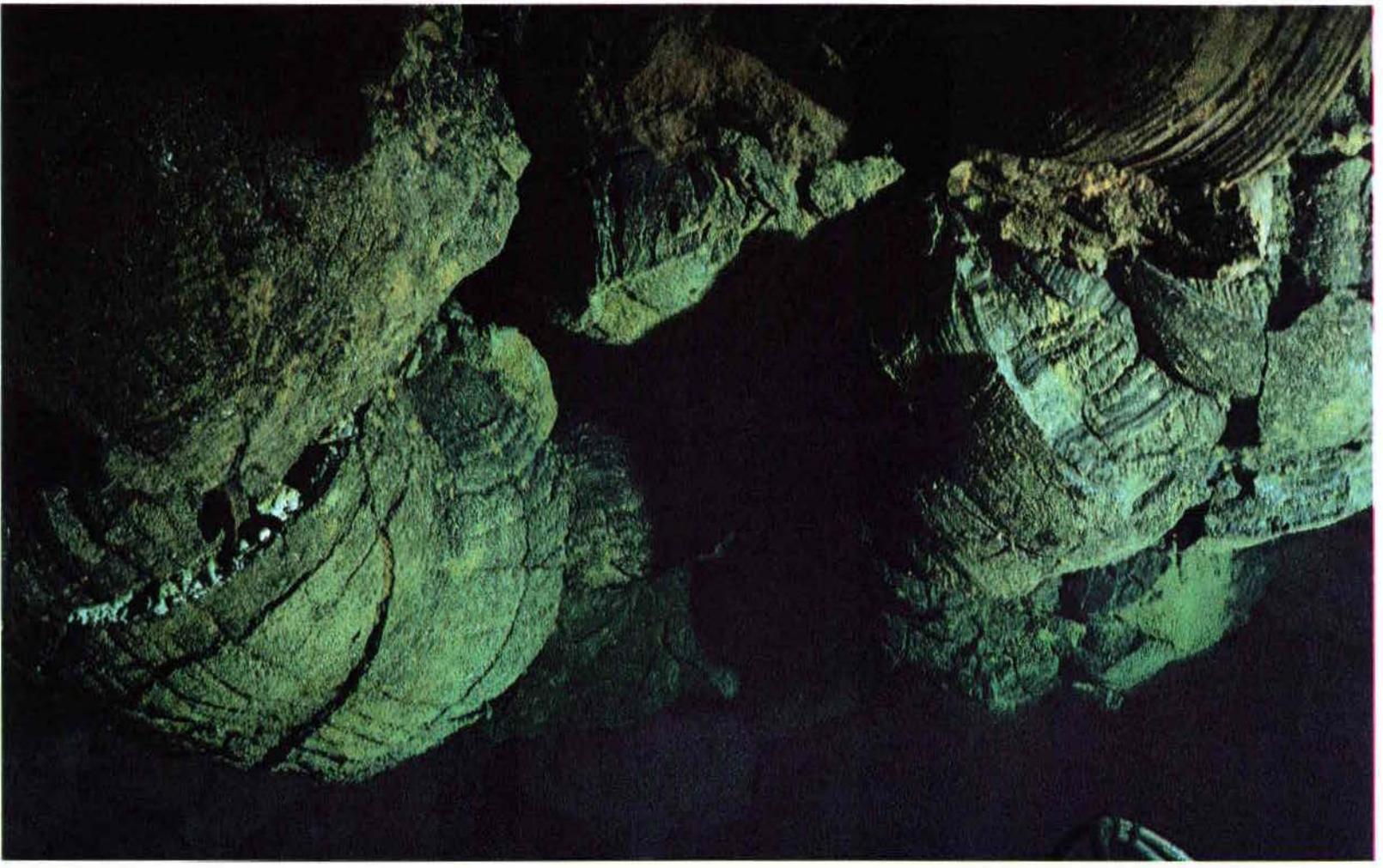
A quoi reconnaît-on la zone étroite où se forme la croûte océanique ? Pour l'observateur qui scrute le fond des océans à travers les hublots d'un sous-marin, le trait le plus spectaculaire est l'aspect noir et brillant du verre basaltique qui tapisse les roches et qui jette mille feux sous la puissante lumière des projecteurs.

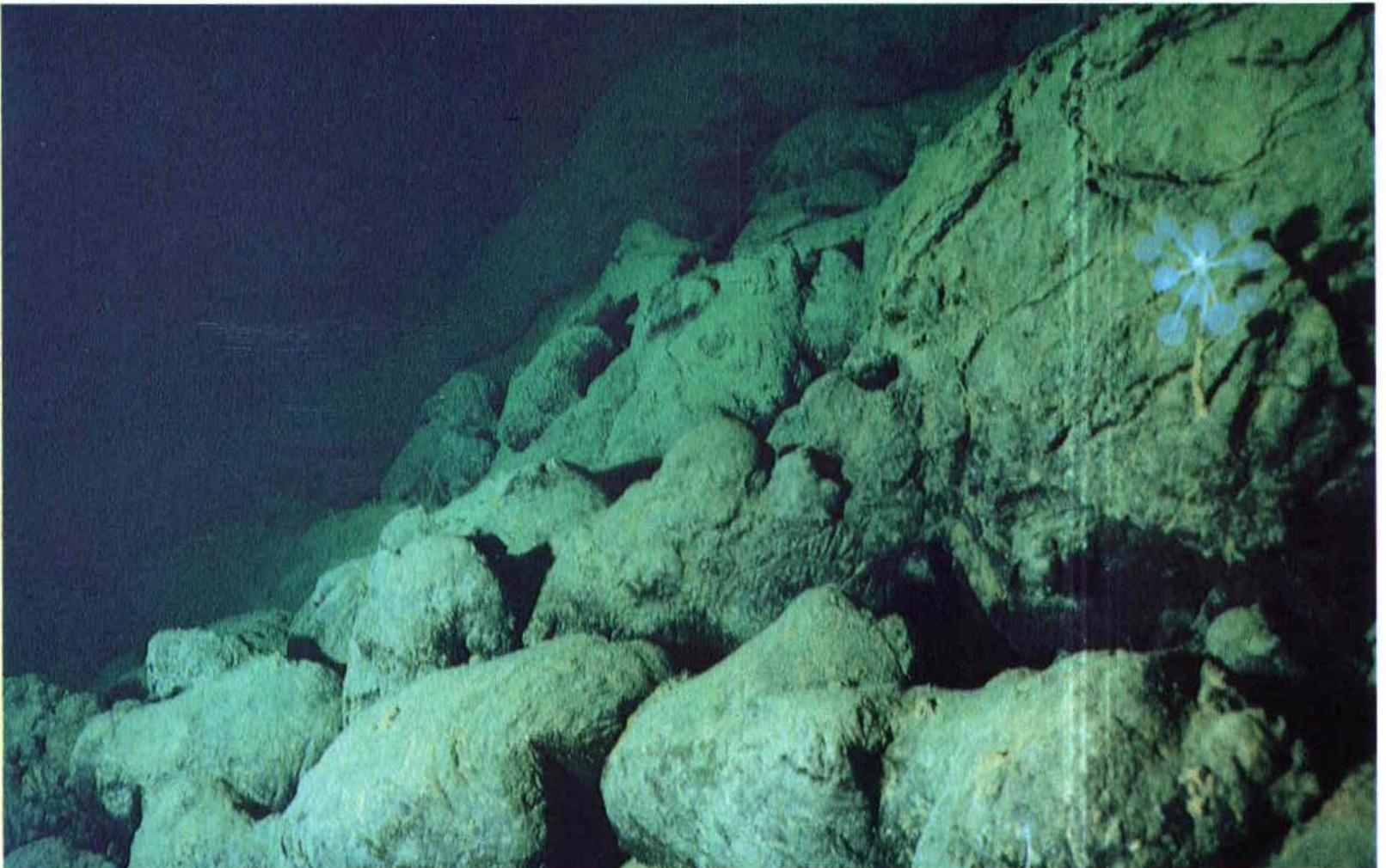
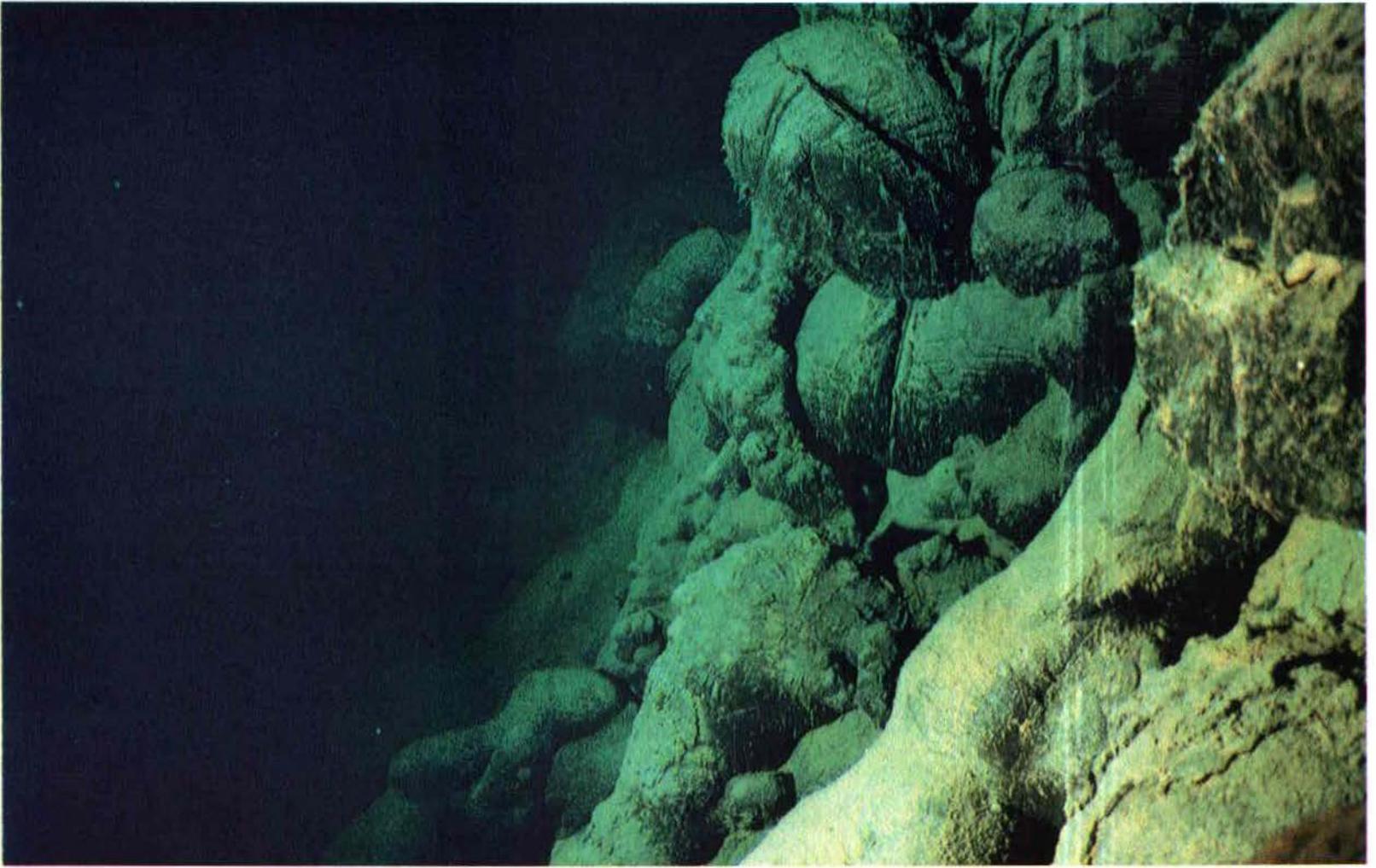
Les laves en fusion ont subi une véritable trempe au contact de l'eau de mer dont la température est proche de zéro degré, comme une barre de métal chauffée au rouge que l'on plonge brutalement dans un seau d'eau glacée. Les laves en forme de tubes ou de coussins se sont souvent figées en pleine pente. Ornées d'innombrables digitations vitreuses, parfois drapées de véritables cascades de verre, elles renvoient une myriade de reflets. Les fragiles protubérances et écorces vitreuses se brisent facilement, laissant une cicatrice qui se couvre vite d'un film blanchâtre de silice amorphe, à la suite de l'altération des silicates par l'eau de mer. Avec le temps, le

How does one recognize the narrow zone where new ocean floor is born ? For the observer, looking through the portholes of a submersible, one of the most reliable guides is the nearly ubiquitous presence of fresh basaltic glass, hard, black and brilliant under the strong lights of the projectors. The glass testifies to the rapid cooling of molten lava ; temperatures of the deep ocean are near zero degrees Celsius and the quenching of the lavas is thus analogous to that of the cooling of red-hot metal plunged into a bucket of icy water. Some of the lavas, frozen into tubular, pillow-like forms as they flowed down slopes, are decorated with numerous glassy digitations and buds, or are draped with thin waterfalls of glass which send out a myriad of reflections. The glassy protuberances and skins break off easily and the scars are rapidly covered by a whitish film of amorphous silica produced by the reaction of ocean water with freshly exposed basalt. With time the glass disappears almost completely, partly

11. **Verre basaltique noir et brillant d'une coulée récente.** La cicatrice blanchâtre est une pellicule de silice amorphe formée au contact de l'eau de mer. Ni sédiment, ni faune.

Black, pristine, still shiny basaltic glass, devoid of sediment and attached fauna, attests to the youth of this steep flow-front of tubular pillow lavas. The pale scar is a thin skin of amorphous silica.





◁ Coussins de lave de la zone axiale

12. **La surface** prend l'aspect de croûte de pain. Les ophiures et la grande astéride à sept bras sont parmi les premiers colonisateurs de la jeune croûte océanique. Surface couverte : 20 m².
13. **Stries et rides** formées à l'écoulement de la lave et conservées grâce à la trempe brutale de l'eau glacée. On remarque des fractures.
14. **Fronts de coulées à pente raide** formées à l'écoulement de la lave et conservées grâce à la trempe brutale de l'eau glacée. On remarque des fractures.
15. **Coulées de laves lobées**, en haut à droite, début de desquamation. Pennatulaire, espèce rare.

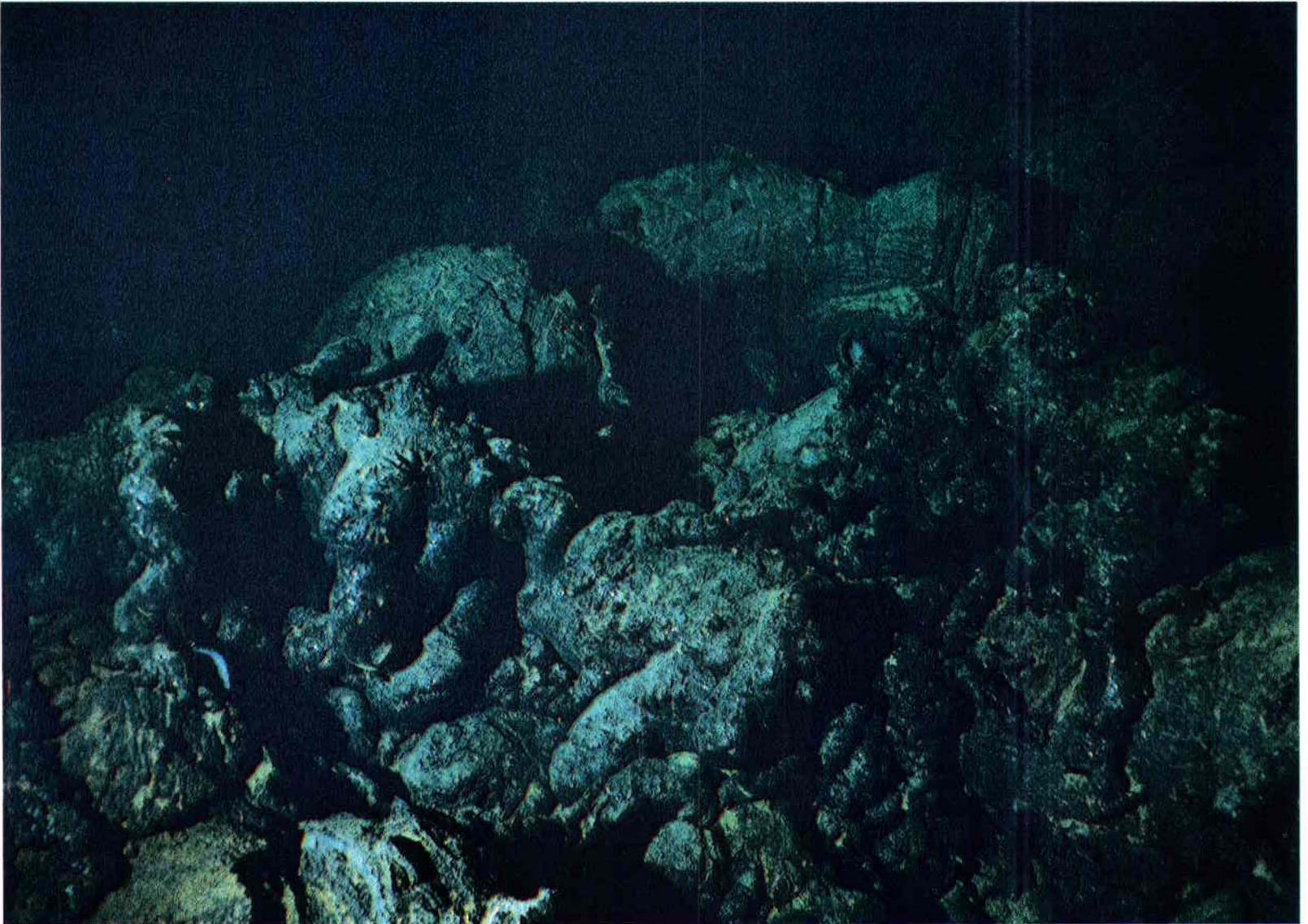
Pillow lavas of the axial zone

The surfaces of the pillows age rapidly and some take on the appearance of freshly baked bread. Broken pillows may show the coloured stains of hydrothermal mineralization. Early inhabitants of the new sea floor : two ophiuroids and a seven-armed asteroid of the family Brisingidae. The photograph covers about twenty square metres.

Striations, corrugations, and transverse and longitudinal fractures, formed during flow, are preserved as the pillow lavas cool in the icy water bathing the East Pacific Rise.

Steep flow-front : a less common sight in the area of the Cyamex dives than in the Famous Rift.

Lobate lavas. Outer, glassy skin begins to spall off (right). Pennatularian.



16. Coussins de lave et protubérances vitreuses.

Pillow lavas with glassy buds.

verre disparaît entièrement ; il se détache et s'altère en une substance argileuse qu'on appelle la palagonite. Du manganèse et des oxydes de fer qui précipitent directement de l'eau de mer viennent recouvrir cette palagonite. La proportion plus ou moins grande de verre à la surface des laves est un très bon indice de leur jeunesse en raison de sa fragilité, et de sa décomposition ou disparition rapide.

Les formidables contraintes d'extension qui règnent à l'axe de la dorsale ne laissent pas de traces visibles dans le couloir étroit où la plus grande partie de la croûte océanique se crée. Les fissures par lesquelles les laves s'épanchent sont scellées au fur et à mesure par de nouvelles coulées, et toutes les petites failles, ou ressauts, formées par l'extension de la croûte sont ensevelies presque immédiatement, à l'échelle des temps géologiques. Cette absence de fracturation est aussi la seconde caractéristique de la zone la plus jeune de la dorsale.

through being detached and partly by alteration to a clayey substance called palagonite. The palagonite, in turn, becomes gradually coated with manganese and iron oxides which are derived directly from the sea water by precipitation. The relative abundance of readily visible glass is thus a good criterion for finding the youngest lavas because it is fragile and decays quickly or becomes rapidly covered.

The formidable extensional stresses at work in the axial zone of the East Pacific Rise are not manifest in the narrow corridor where most of the crust is created. The fissures through which the lavas rise are continually sealed by new flows, and any small, faulted steps associated with the extension of the crust are buried almost immediately on the time scale of geological processes. The virtual absence of tectonic features is, then, like the glass, a signature of the youngest part of the crest of the Rise.

Un dernier critère est l'absence quasi-complète de sédiments et de faune. En dehors de quelques zones, très ponctuelles, où des sources chaudes créent des oasis de vie animale, la zone d'extrusion volcanique est un véritable désert biologique, avec de rares animaux fixés sur les laves dénudées.

Par ces critères on peut délimiter, non sans quelques difficultés, les frontières de la zone où se met en place la nouvelle croûte océanique. En effet, les changements dans les traits du fond océanique sont souvent en demi-teinte, et tout ne varie pas en même temps. Il faut donc établir une certaine hiérarchie de critères. Si l'on admet que l'absence de structures tectoniques visibles, failles ou fissures, est le critère principal, on peut distinguer, même dans une bande d'un kilomètre de large, une zone jeune, à l'axe de la dorsale, aux laves très brillantes, hérissées de protubérances vitreuses et dépourvues de tout sédiment, et des zones légèrement plus anciennes, de part et d'autre de la zone axiale, avec des laves déjà mates, légèrement saupoudrées de sédiment ; les organismes vivants y apparaissent pour la première fois.

Cette zone, dite d'extrusion axiale, est constituée de deux grands types de coulées : les laves en coussins et les laves fluides.

A third criterion for identifying the zone of crustal creation is the twin paucity of sediments and of benthic macrofauna attached to the sea floor. Except where hot springs produce rare oases of life, the extrusion zone is a biological desert where hardly any creatures have taken a firm hold on the bare rocks.

Although the zone of emplacement of new crust can be found by using as guides the lack of visible evidence of tectonic activity, a non-existent or thin sediment cover, a near absence of 'in situ' fauna and the abundance of fresh glass, precise mapping of the borders of the zone is not a straightforward exercise. This is because changes in the character of the sea floor are more commonly subtle than sharp and not all types of change occur together. However, if we take the absence of visible faults and fissures as the deciding property for defining the principal extrusion zone, we find that we can distinguish reasonably clearly two different types of terrain within it, even where it is a mere one kilometre wide. The youngest terrain, straddling the middle line of the crest, includes the lavas with shiny glass buds and is completely devoid of sediment. The slightly older terrain, flanking the middle zone, exhibits lavas with a matt surface, is lightly dusted with sediment and is the home of the first animals to appear in significant numbers.

The volcanic flows in the zone of extrusion of new crust can be conveniently assigned to two main groups : pillow lavas and fluid lavas.

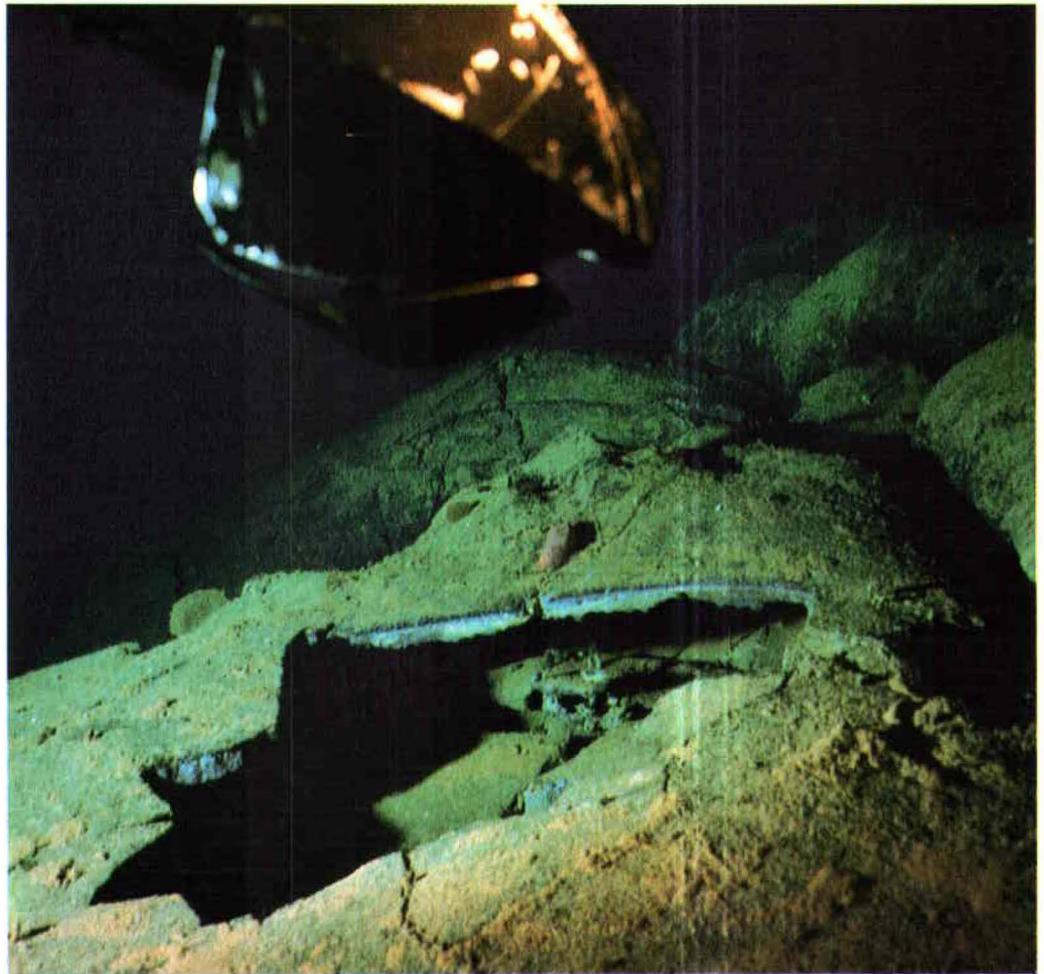


◁ 17. **Prélèvement de basalte** par le bras de Cyana sur une coulée de laves lobées; près de la pince, une anémone de mer (Actinaria), plus loin deux holothuries, bleue et rose (la pince a dix huit centimètres).

The mechanical arm of Cyana, with its 18 centimetre-long claw, reaches for a sample of basalt from a gentle slope of lobate lava. The flow, perhaps only a few thousand years old, has already lost the patina of extreme youth. Near the claw is an actinarian. To the right are two holothurians, one blue and one pink.

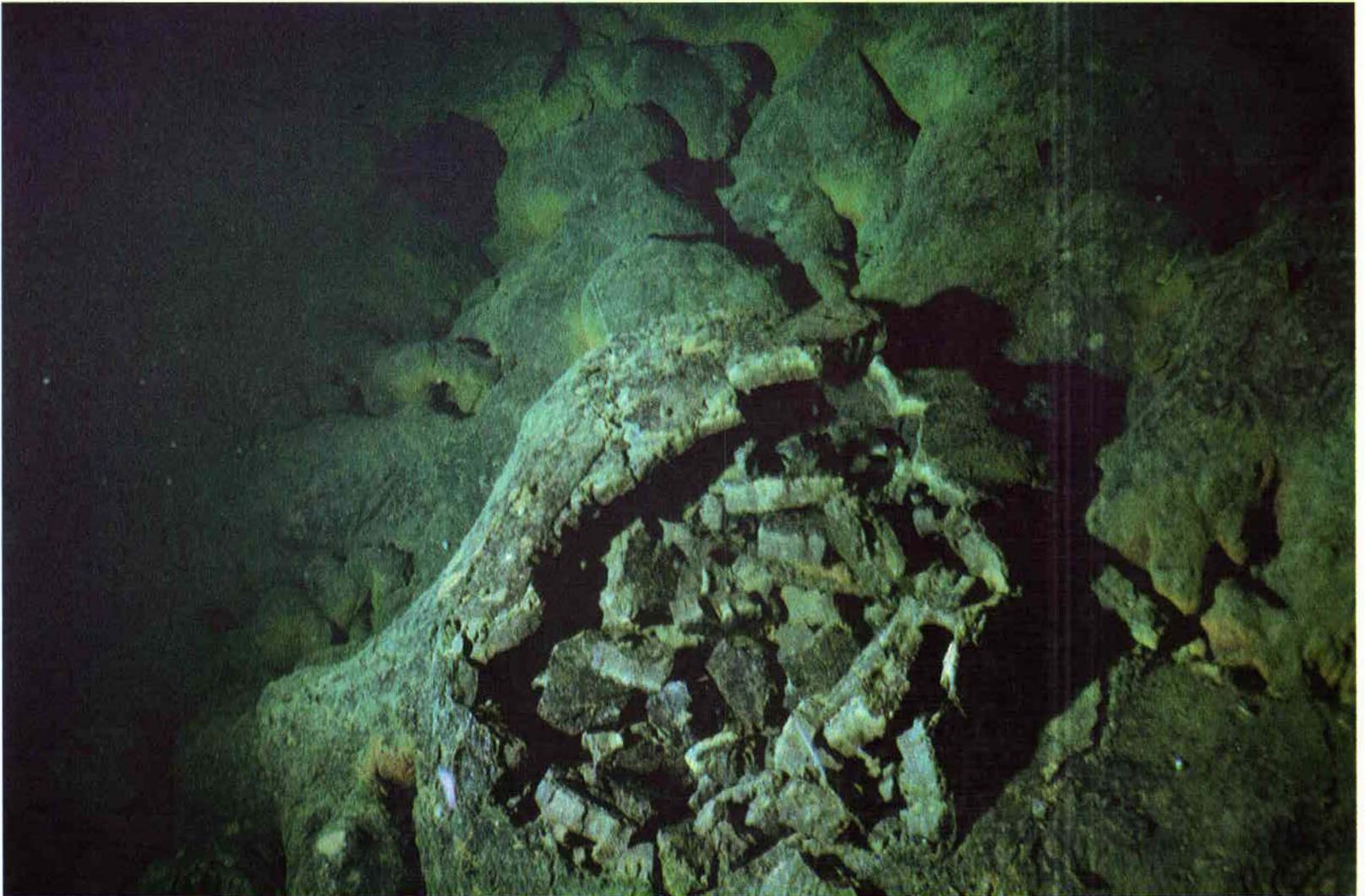
18-19. **Effondrements de tube de lave creux.** ▽ ▷

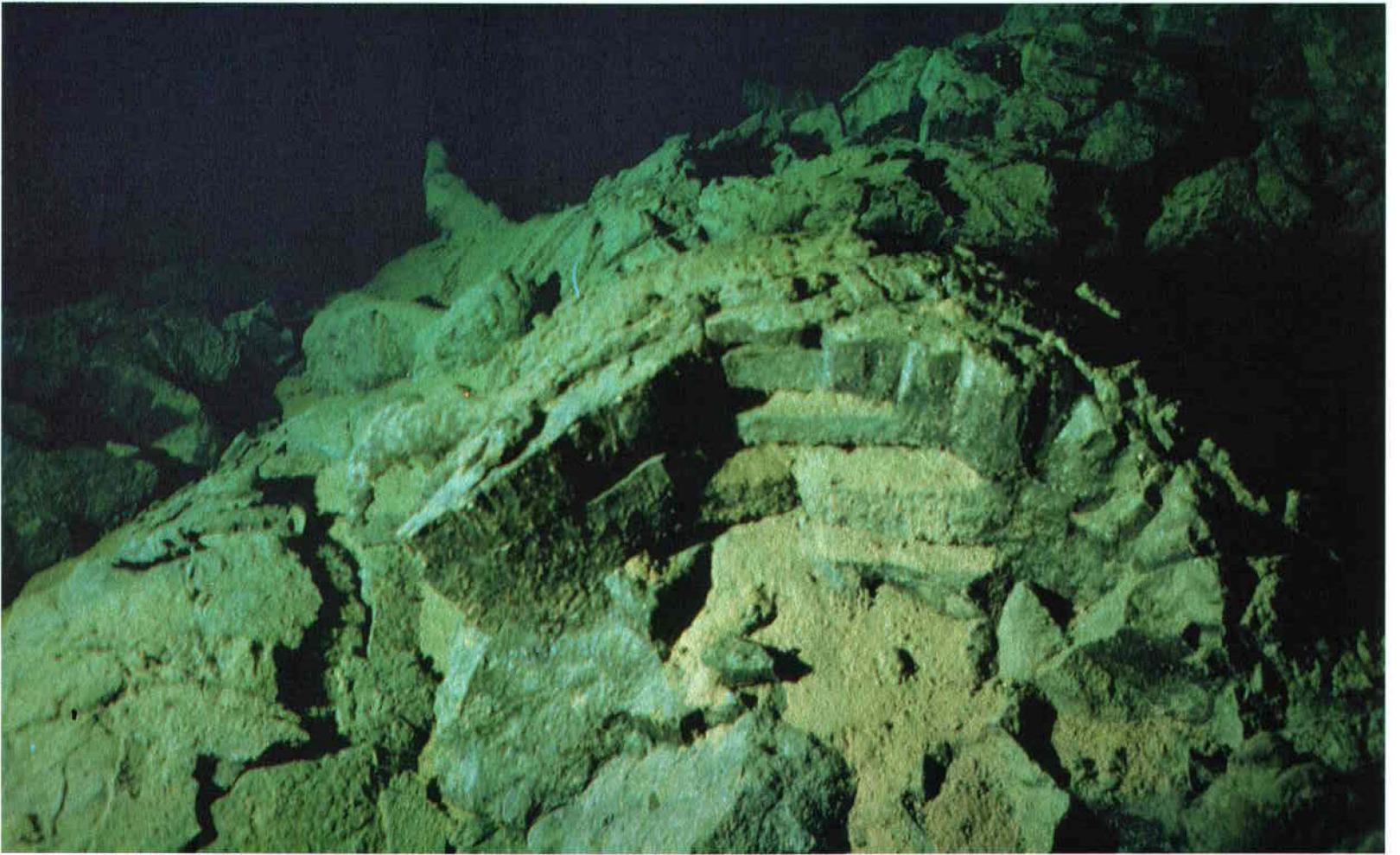
The draining away of lava can leave an empty tunnel after a flow has hardened. When the roof collapses fragments of it fall into the void. Pink actinarian.



19

18



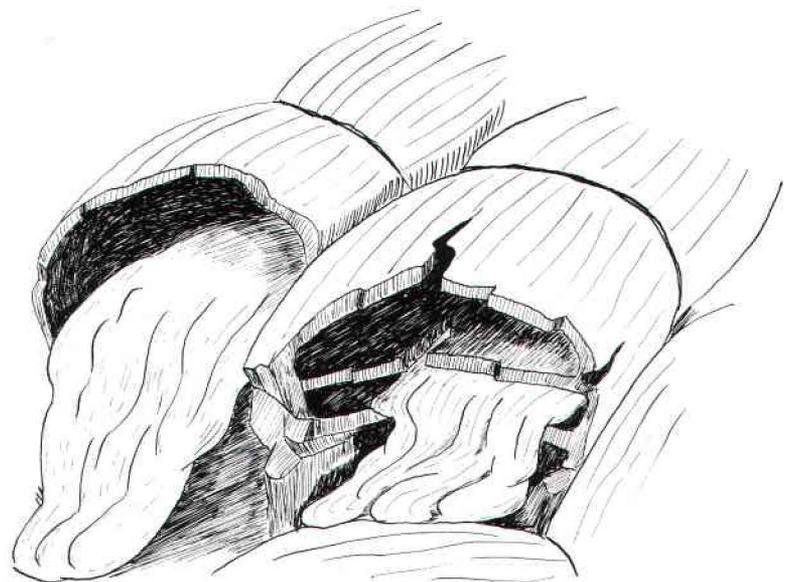


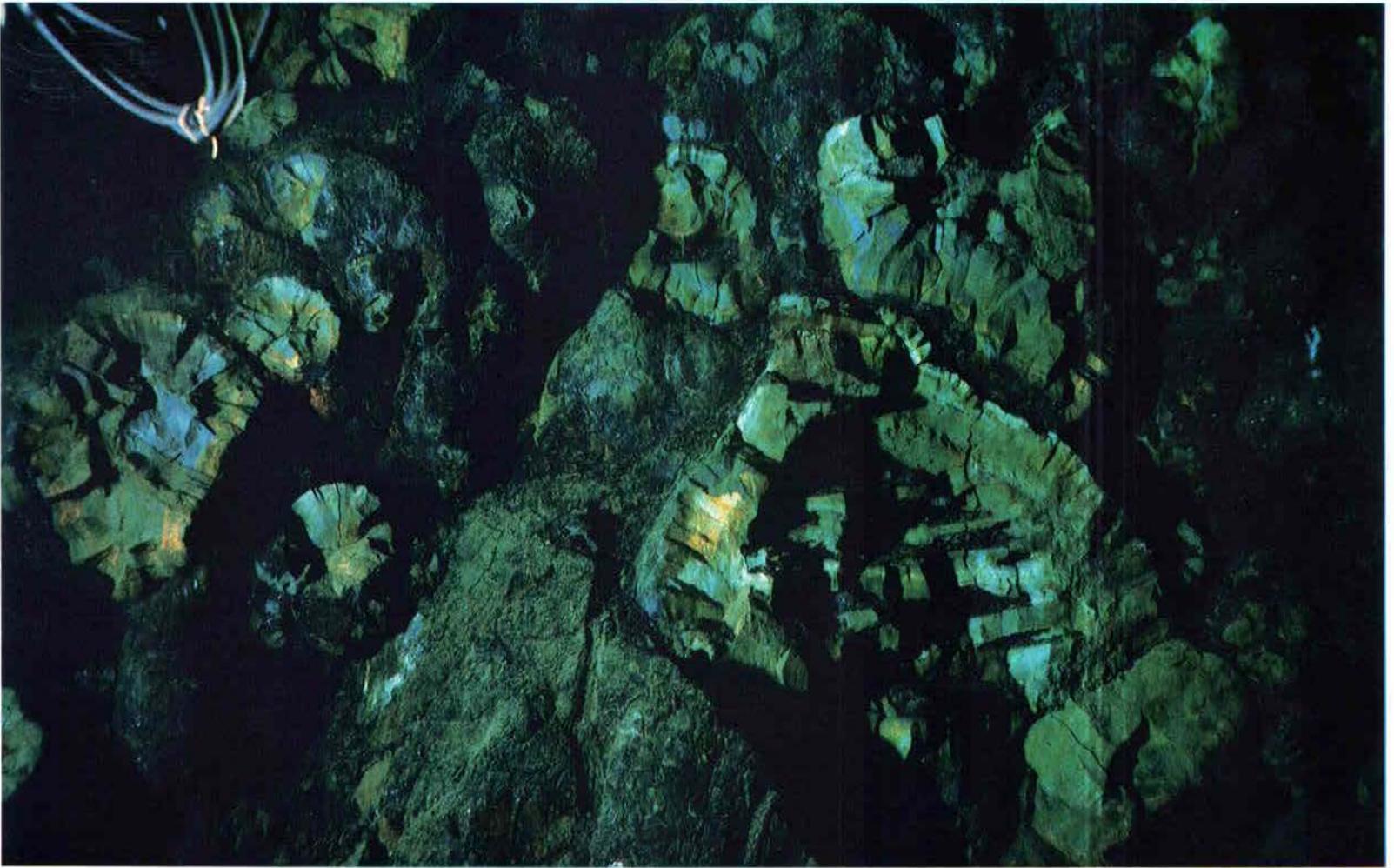
20

Sections de tubes creux

Les planchers horizontaux montrent les niveaux successifs de la lave en refroidissement.
En jaune, sédiment pélagique.

Drained pillows on a gentle slope may leave a series of sub-horizontal ledges instead of a single, outer skin. The yellowish patches are pelagic sediment.





21

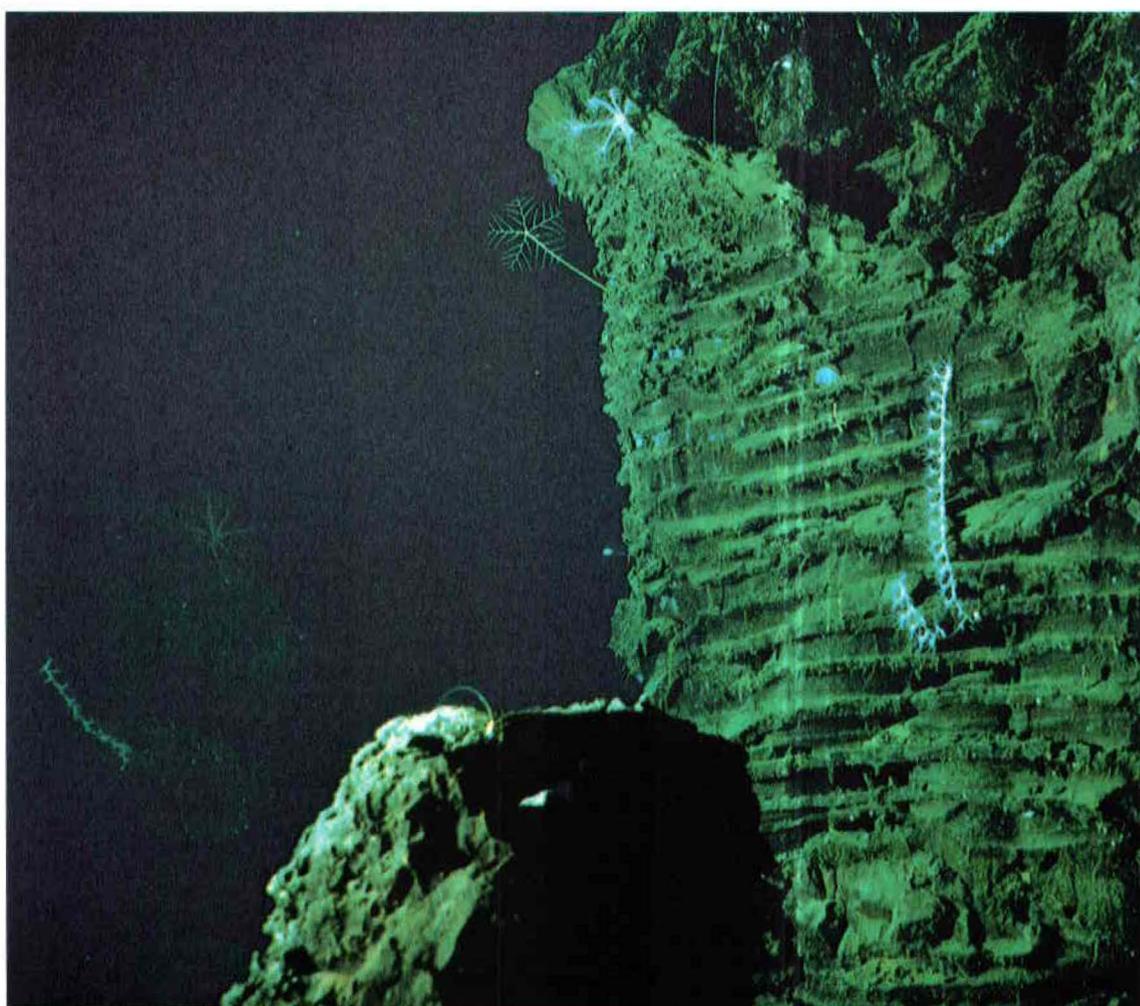
Les laves en coussins

Les laves en coussins construisent des reliefs. Elles s'accumulent au-dessus de fissures émissives pour construire des collines à flancs très raides, de trente à quatre-vingt mètres de haut et de quelques centaines de mètres de large, allongées parallèlement à la dorsale. Sur le sommet de ces édifices, véritables volcans fissuraux, les coussins de lave sont bulbeux, aplatis et souvent creux, comme le montre l'effondrement fréquent de leur mince toit vitreux. Il s'agit de véritables tunnels de lave, créés quand l'intérieur encore chaud des coulées a pu s'en échapper. Les tunnels alimentent des coulées tubulaires très allongées qui descendent le flanc raide des édifices volcaniques. Des coulées secondaires s'échappent parfois par rupture des parois des coulées principales, ce qui complique le réseau des laves. Les coulées tubulaires ont souvent des parois ornées de stries, formées quand la lave était encore chaude. Les tubes de lave montrent aussi des rides et des fractures, témoins de leur avancée par étirements et éclatements successifs de leur fragile écorce. Parfois l'effondrement des tubes de lave permet de voir, à l'intérieur, des couches à peu près horizontales. Ce sont des niveaux temporaires de refroidissement des coulées, témoignant de plusieurs épisodes successifs dans le drainage des laves. Ces niveaux constituent pour le spécialiste du magnétisme des roches de précieuses indications sur l'horizontale. La formation des laves en coussins, longtemps demeurée mystérieuse, est maintenant bien comprise. Elle est illustrée dans le film américain « Le Feu sous la mer » qui montre ce qui se passe sous l'eau, aux flancs de l'île d'Hawaïi, quand les laves entrent dans la mer. Nul n'a été témoin d'une éruption volcanique sur le fond de l'océan mais, à en juger par la morphologie des laves figées dans l'eau de mer, les processus observés à faible profondeur au large de l'île d'Hawaïi ne doivent pas être très différents de ceux qui opèrent sur les dorsales médio-océaniques.

Pillow lavas

*Pillow lavas are relief-making. They pile up over emissive fissures, commonly building very steep-sided hills lined up in the general direction of the Rise. The hills can be as much as thirty to eighty metres high and a few hundred metres wide. The pillow lavas at the summits of these volcanic edifices tend to have a flattened, bulbous shape. Many of the pillows must be hollow, with thin carapaces, because one sees many pillows with collapsed roofs. The hollow interiors often represent tunnels created by the draining away of the hot cores of the lava piles. The lavas that are drained off feed long, tubular flows on the steep slopes of the edifices. Secondary flows sometimes rupture the flanks and complicate the primary emissive pattern. The surfaces of the long, tubular pillows pointing downslope are commonly etched with striae while the lava is still hot. The lava tubes also display corrugations and fractures showing that their advance involves stretching and breaking of their rapidly quenched and brittle outer shells. In some cases, the collapse of pillow tubes allows one to see subhorizontal layers within their interiors. The layers represent cooling levels that are tokens of episodic drainage and flow. These layers are precious criteria for the orientation of pillow samples for studies of their remanent magnetic properties. Many of the processes involved in pillow-lava formation, once mysterious and now quite well understood, are illustrated in the spectacular american film *Fire Under The Sea*, which shows what happens under water when subaerial lava flows from the flanks of the island of Hawaii enter the ocean. No volcanic eruption in the deep sea has yet been witnessed or photographed but, judging from the morphologies of the quenched flows, the processes operating in the shallow waters off Hawaii are essentially similar to those that operate on the Mid-Oceanic Ridge.*





Les lacs de lave

◁ 22-23. Ces coupes naturelles montrent la stratification des parois et les piliers résiduels au milieu des lacs effondrés. La surface lobée des anciens lacs de lave est lisse, les piliers sont creux.

The upper surfaces of cooled lava pools, represented by lobe-shaped flows, produce smoother terrain than adjacent pillows. Natural cross-sections show the pseudo-stratified vertical faces of the side-walls of the pools and of the pillars that rise up from the sunken floors.

Piliers de lave

▷ 24-25. Hauts de plusieurs mètres parfois, ils sont régulièrement stratifiés par des saillies vitreuses auxquelles s'accrochent des stalactites. Un grand actiniaire au sommet, un crinoïde pédonculé qui se détache bien sur l'eau, une gorgone élancée au centre, ce sont les premières formes d'une vie encore rare à l'axe de la dorsale.

The pillars stand as high as several metres. The ledge-like quasi-layering is regular, and stalactites hang from the under-surfaces of the ledges. Some of the pillars seem to be sites of concentration of the scarce fauna found in the area of youngest crust. A large actinarian sits on top of a pillar. Among the other creatures: a stalked crinoid and a bright white coral (Gorgonacea).

Les coulées fluides estompent les reliefs. Elles envoient les creux topographiques entre les rides volcaniques formées de coulées en coussins. Elles donnent naissance à de véritables « lacs de lave » temporaires, dont la surface plus ou moins plane, sur plusieurs kilomètres carrés, tranche sur le moutonnement des « pillow-lavas » encaissants. Un drainage précoce, intervenu bien avant le refroidissement et la consolidation complète de ces « lacs de lave », a presque toujours entraîné l'effondrement de la partie centrale, laissant un champ de piliers verticaux résiduels qui peuvent atteindre de dix à quinze mètres de haut, mesure de l'épaisseur que pouvaient atteindre ces laves fluides. Ces paysages ruiniformes, évoquant des acropoles englouties, constituent une des surprises découvertes de l'expédition Cyamex.

De telles formes de relief n'avaient jamais été observées ou photographiées sur les fonds océaniques avant l'expédition des Galapagos. Mais sur ce rift elles n'atteignaient pas l'échelle rencontrée sur la dorsale de Rita. L'origine des piliers est énigmatique. L'hypothèse la plus attrayante est que les piliers résultent de la percolation d'eau chaude à travers les lacs de lave encore liquide. Au cours d'une éruption au fond de l'océan, l'eau de mer peut être piégée sous les coulées dans les innombrables fissures qui criblent le toit de la croûte océanique. Cette eau, réchauffée à une température de plusieurs centaines de degrés, augmente considérablement de volume et se fraye un chemin le long des fissures, à travers le lac de laves fluides où règne une température de plus de 1 200 degrés. L'eau, même chaude, réalise une trempe des laves le long des cheminées où elle percole. Avec un retrait rapide des laves, ne subsistent que des tubes creux verticaux ou bien des piliers à parois basaltiques à grain fin. Au sommet de ces piliers, on trouve souvent des animaux fixés, comme embusqués dans ces repaires privilégiés.

The fluid lavas are relief-smoothing. They systematically flood, or partially flood, pre-existing topography covered with pillow flows, and they give birth to temporary pools of lava with an approximately planar, horizontal surface. The areas occupied by the pools can cover up to several square kilometres, and stand in striking contrast to the rougher, rolling topography created by accumulations of pillow lavas. The whole central parts of the pools are typically collapsed, presumably because drainage occurs nearly always before the pools can cool fully and consolidate. All that usually remains is a field of residual pillars, as high as ten to fifteen metres, which furnish a yardstick for the original depth of the pool of molten lava. The ruin-like, pillared landscapes, reminiscent of abandoned cathedrals, were in a way a surprising discovery of the expedition. Pillars had been previously seen on the Galapagos Rise but on a much less spectacular scale. Before the Galapagos find, nothing similar had been observed or photographed in the deep sea. The origin of the pillars is an entertaining subject for speculation. The most attractive suggestion that has been made is that the pillars were formed as a result of jets' of hot water rising through pools of still-liquid lava. During the eruption of a lava flow on the ocean floor, sea water would be trapped under the flow within the many cracks and fissures pervading the upper part of the oceanic crust. The water would be heated up to temperatures of many hundreds of degrees Celsius and would thus be subject to a large increase in volume. The sea water, driven upwards along discrete conduits in the underlying rocks, would pierce the mass of hot, fluid lavas, which are at a temperature of more than twelve hundred degrees Celsius; during its ascent through the molten lava pool, the water would quench the lavas in contact with it. As the temporary lake empties, vertical, hollow tubes or pillars with fine-grained basaltic walls would remain. Living organisms have attached themselves to the summits of many of the pillars, apparently finding there congenial niches.

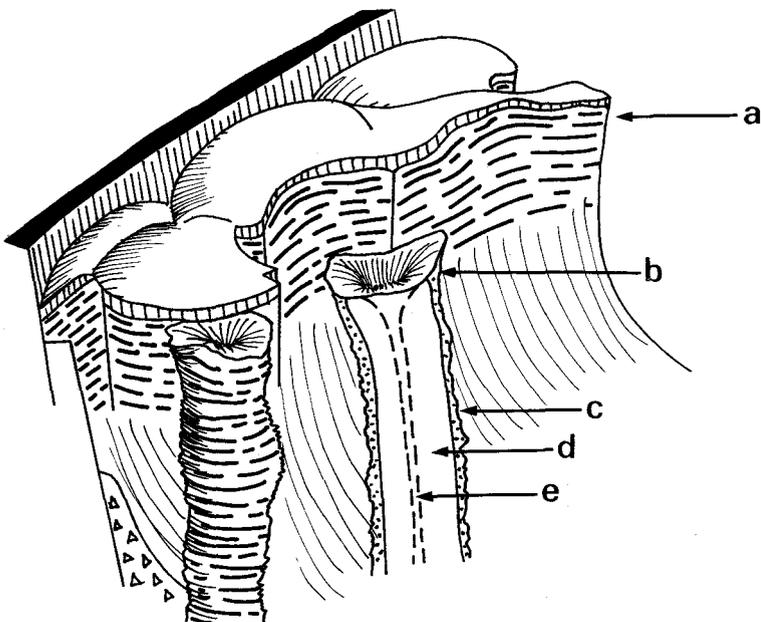


Schéma d'un pilier à la bordure d'un lac (a). Le pilier, évasé au sommet (b) montre une pseudo-stratification (c) autour d'une tige de basalte massif (d) percée d'un orifice axial (e).

The margins of a cooled lava pool have superficial bands of black and glassy basalt alternating with grey crystalline basalt (a). The bands are also observed on the exterior of the pillars (c). The pillars have a funnel-shaped top (b), grey, crystalline basaltic walls (d) and, it seems almost always, a hollow core (e).

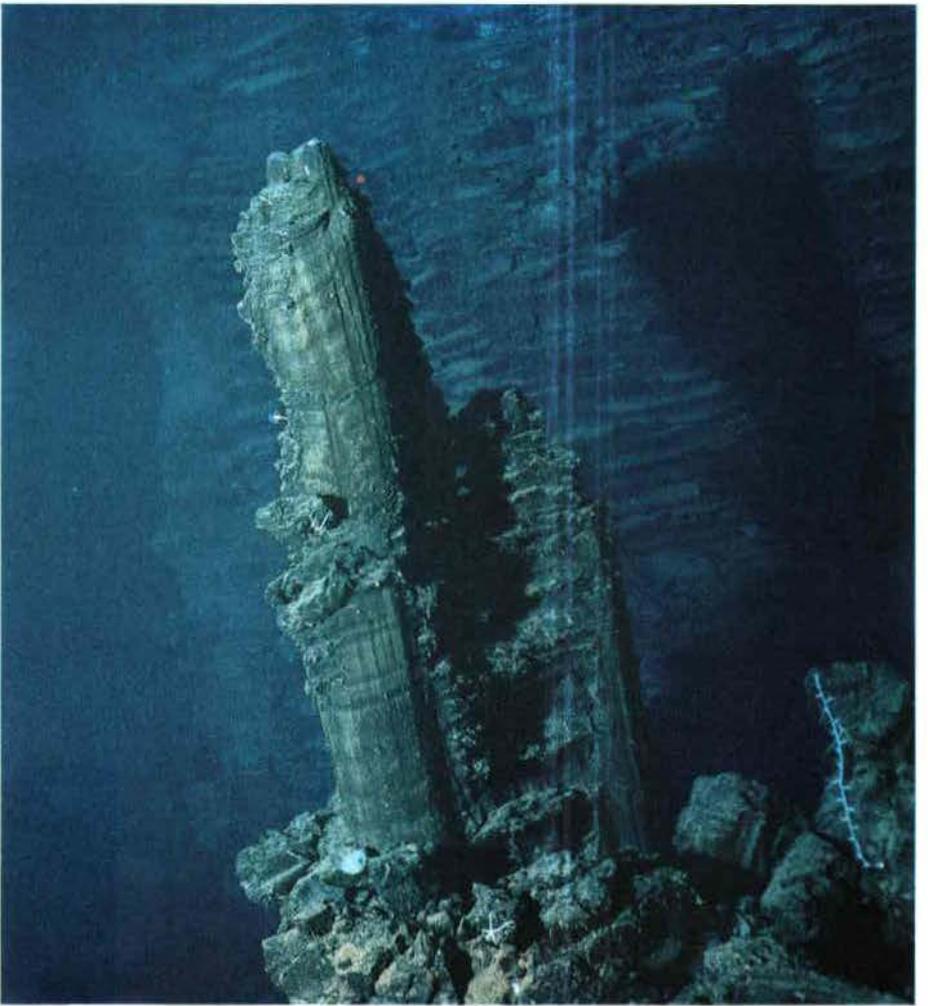
Acropoles englouties

26 à 29. Les piliers sont de tailles et de formes très variées : en arches ou solitaires. Leurs fûts grêles sont marqués de stries verticales (26 et 27), provoquées par le glissement de laves pâteuses sur les colonnes de basalte solide. Au sommet d'un pilier un actiniaire (29).

The pillars vary in shape and size and are unevenly distributed within the lava pools. Fragments of the original surface of a pool can act as a roof bridging several pillars; or long, slender pillars, thinning downwards from their summits, may stand alone. The vertical striations on some pillars may have been produced by down-drag of still plastic material along the resistant shafts. On the top of the pillar : an actinarian (29).



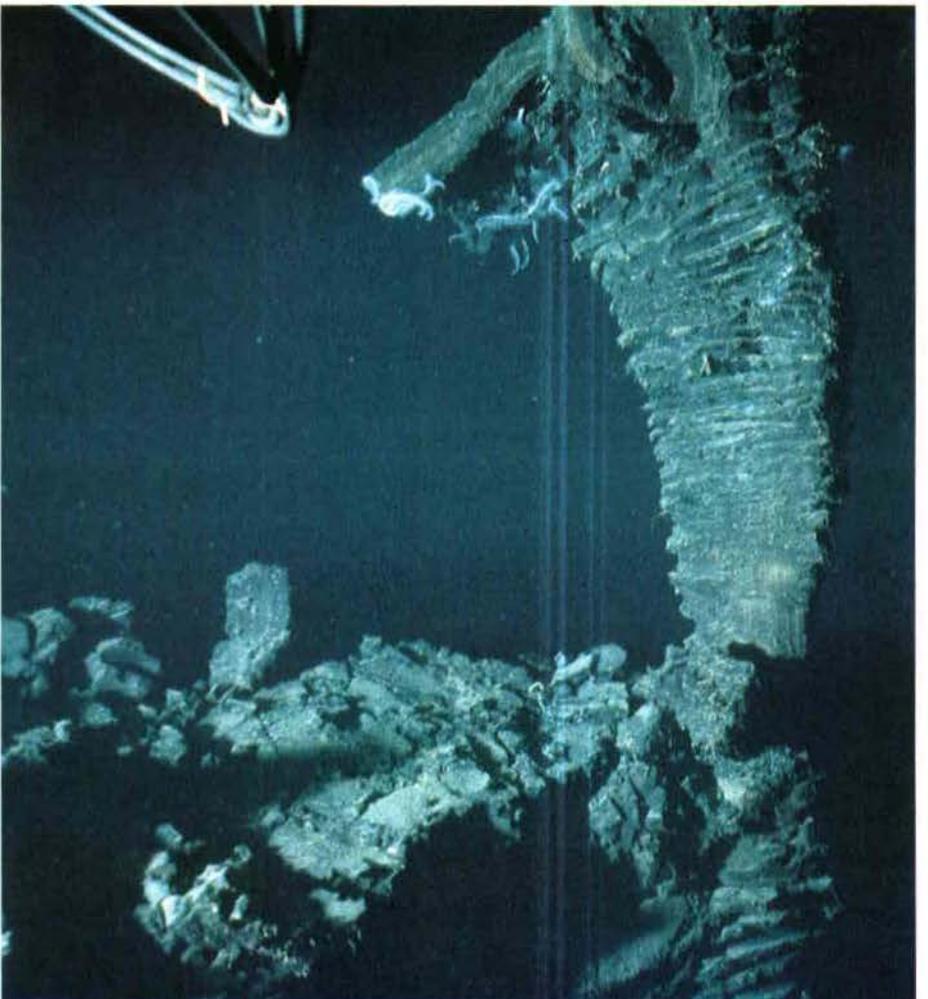
26



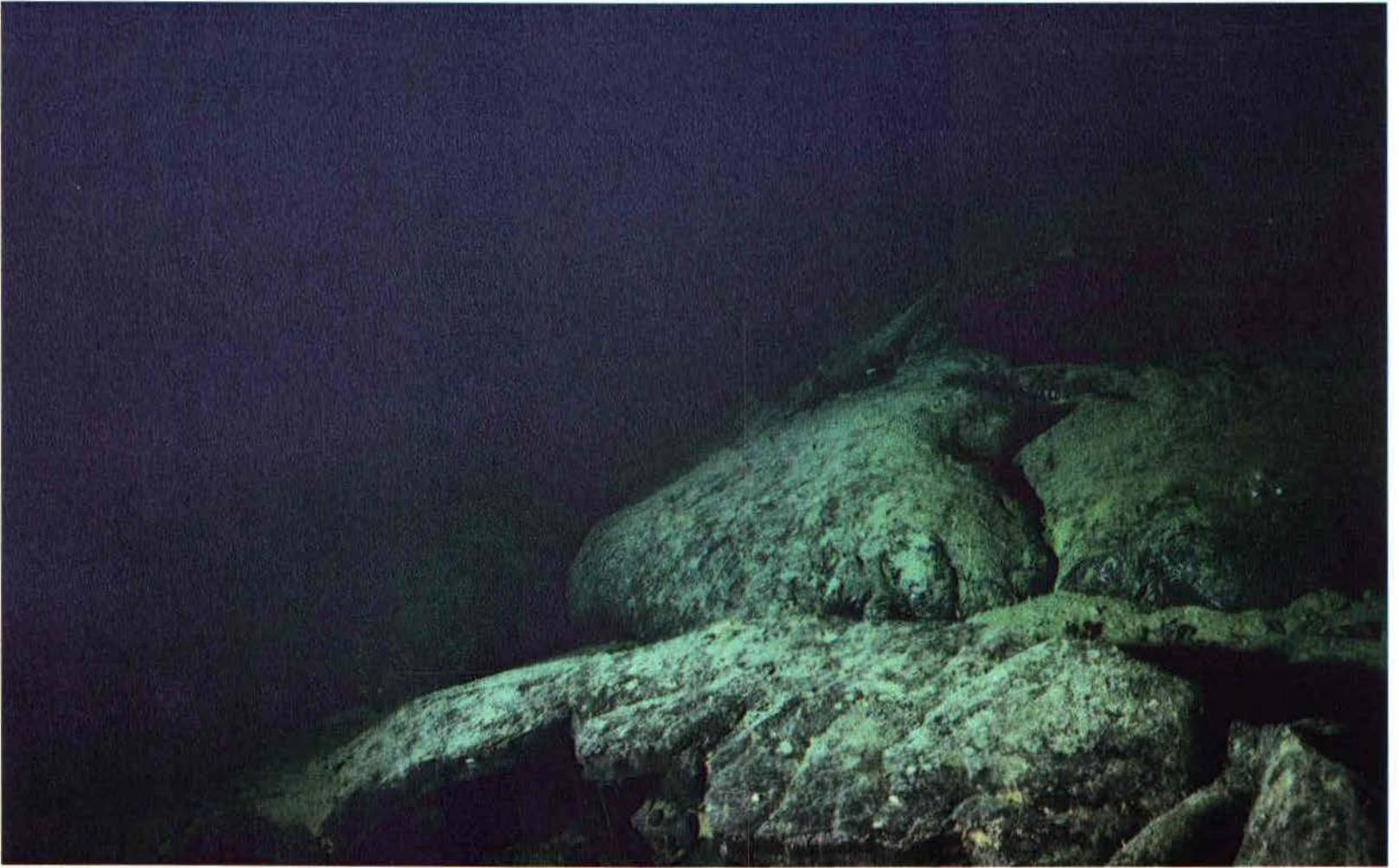
27



29



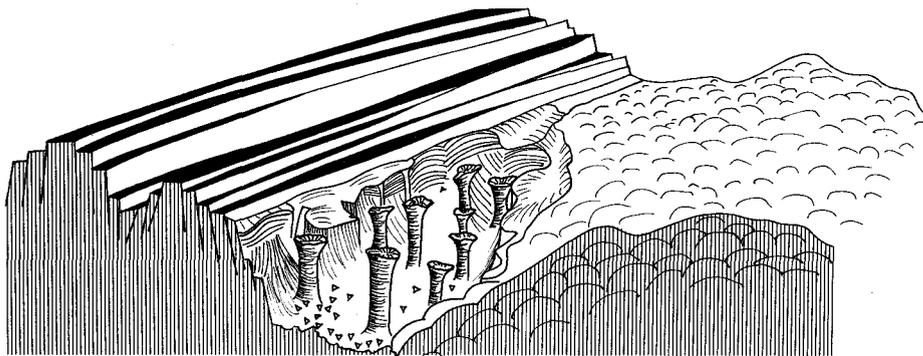
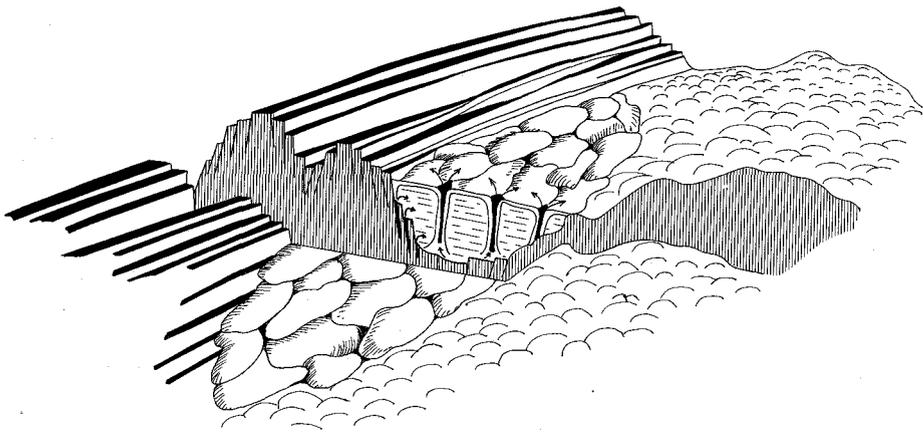
28



30



31



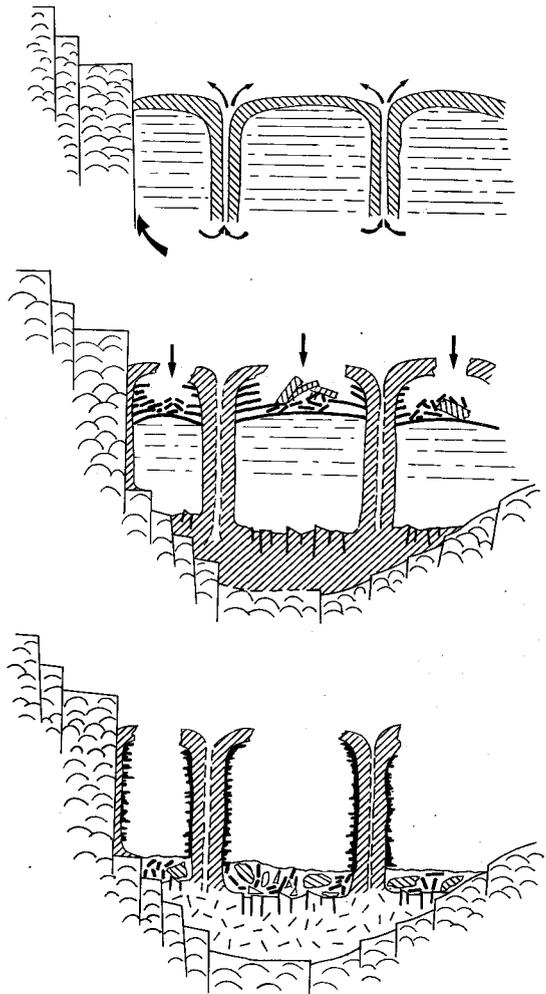
Reconstruction de l'évolution d'un lac de lave et de la formation des piliers

L'eau de mer, piégée dans les fissures de la croûte océanique, est réchauffée pendant la mise en place des laves ; elle remonte en colonnes liquides internes et provoque une cristallisation de piliers. Une vidange rapide du lac fait surgir les champs de piliers.

La surface externe des piliers montre un espacement régulier d'anneaux. L'étude des échantillons recueillis par Cyana indique que ces anneaux sont formés d'une alternance de verre basaltique noir et de basalte gris à grain fin qui se serait refroidi plus lentement. Les anneaux vitreux ne forment pas de véritables couches mais sont simplement accrochés à la paroi externe des piliers et font saillie de quelques centimètres, avec des « stalactites » de verre sous leur face inférieure. L'espacement, centimétrique à décimétrique, des saillies vitreuses indique qu'elles représentent des niveaux successifs dans le refroidissement de la surface du lac de lave pendant qu'il se vidait. Mais on ne comprend pas pourquoi ces niveaux sont si réguliers. Le fait que les anneaux vitreux sont simplement attachés aux parois des piliers montre clairement que des colonnes creuses existaient déjà avant que le lac ne se vide. La surface originelle des lacs liquides, maintenant figée et vitreuse, était typiquement lobée : cela est encore visible sur les bordures des zones effondrées et sur les fragments du toit des lacs qui forment des arches entre les piliers. Dans certains cas, les bordures des lacs ont pu être observées, montrant le même pseudo-litage que les piliers.

30-31. Toit lobé d'un lac de lave fossile.

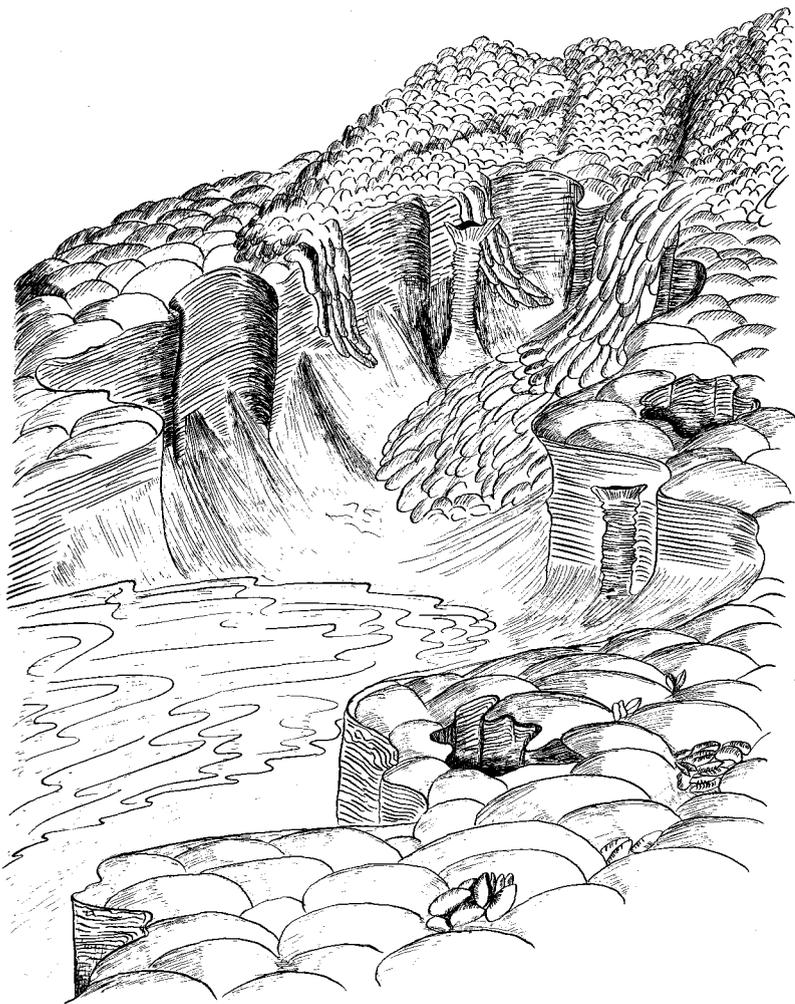
Lava pools with their smooth lobate surfaces.



Diagrammatic view of the possible origin of the pillars

Jets of sea water, trapped at shallow levels in the oceanic crust by a volcanic eruption, pierce the lava of a pool and quench sleeves of molten basalt that are exposed as pillars as the liquid of the pool drains away rapidly.

The external faces of the pillars exhibit a very regular, horizontal banding on a scale of centimetres or decimetres. The study of samples of the pillars has shown that the bands represent black glass and alternating gray, crystalline and less rapidly cooled basaltic rock. The glassy bands are not the surface expression of layers within the pillars but are 'stuck' onto their external faces. They jut out a few centimetres as small ledges, and have stalactite-like protuberances hanging from their undersides. The vertical repetition of the glassy ledges may reflect intermittent episodes of surface cooling during the withdrawal of the lava pool, but it is not clear why such episodes should be so regular. In any event, the observation that the glassy bands are merely attached to the outer walls of the pillars shows that the precursors of the pillars themselves were in existence before the pools emptied. The original, now glassy surfaces of the hot, liquid lavas must have been lobe-shaped, judging from the remains of pools preserved at the borders of the central collapsed areas and from the few fragments of the roofs of the pools that occur as bridges across the summits of pillars. Here and there, cross-sections of the borders of the older lava formations encircling the pools can still be seen, and they show the same pseudo-stratification as the pillars themselves.



Laves en coussins ou laves fluides ont envahi certains lacs effondrés.

Collapsed lava pools can be invaded by pillow flows and by flows with drape-like surfaces.

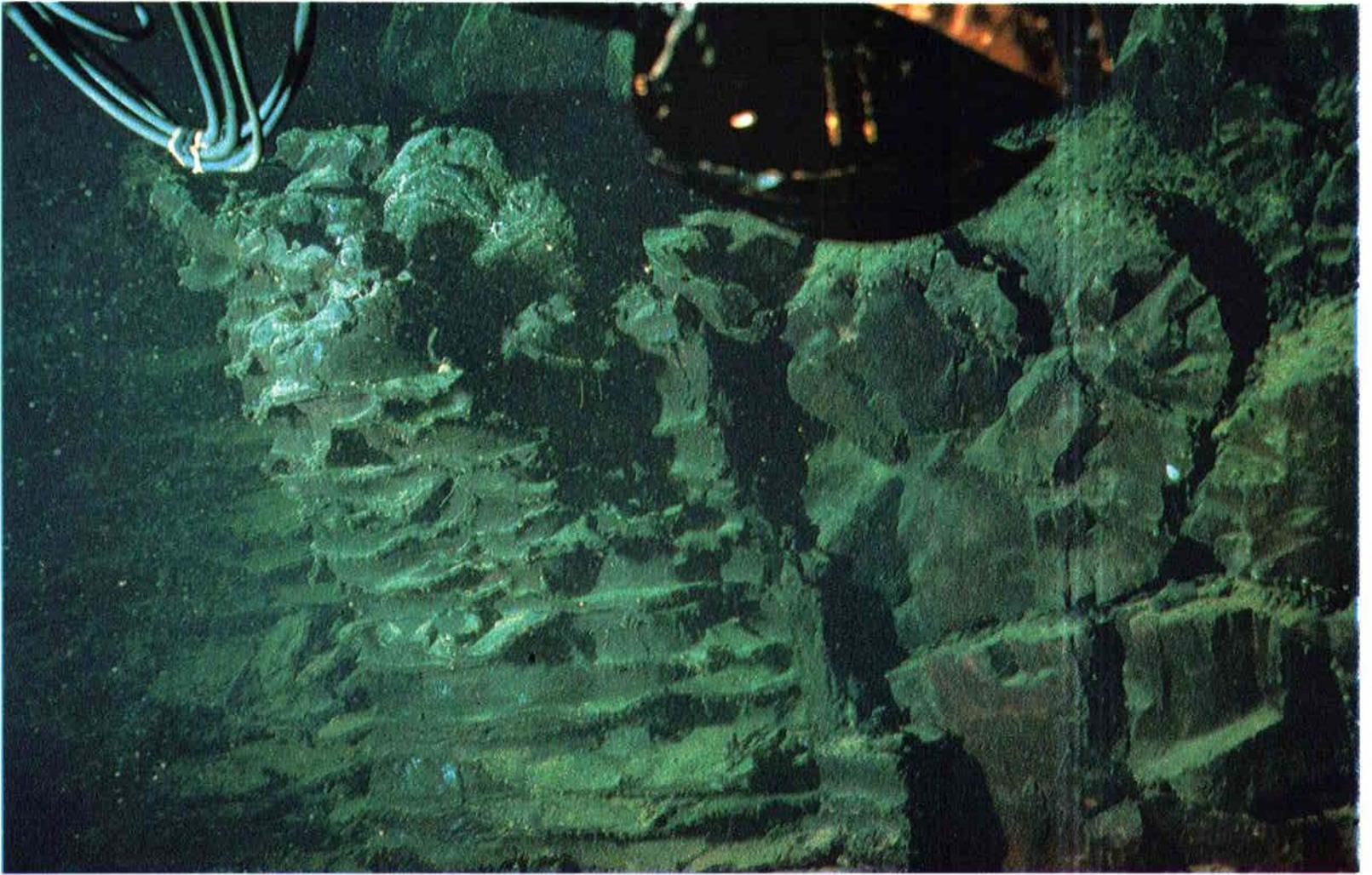
D'autres coulées fluides, moins volumineuses, de un à deux mètres d'épaisseur, ne forment pas les morphologies complexes que l'on rencontre dans les champs de piliers mais offrent l'allure plus classique de simples coulées de type « pahoehoe » de Hawaïi, avec des surfaces cordées ou plissées. La surface agitée de ces laves est probablement due à leur entraînement rapide par un courant de surface et à la création de tourbillons en régime turbulent. Très souvent, ces coulées en draperie forment la partie supérieure d'unités basaltiques massives, produites par un refroidissement lent en régime statique.

Origine des laves

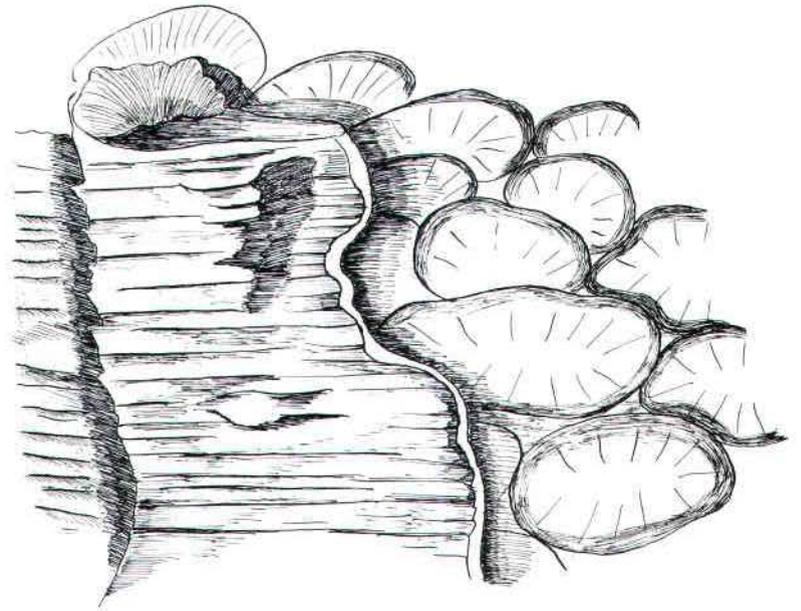
Les relations entre coulées fluides et coulées en coussins sont complexes. On observe tantôt des lacs de lave établis dans les creux d'une topographie à pillows, tantôt des coulées à pillows s'engouffrant dans les zones effondrées de lacs de lave. Sur des murs de failles offrant des dénivelés importants, on observe parfois des coulées massives ou des coulées fluides de plus faible épaisseur alternant avec des coulées en coussins. En règle générale, les observations effectuées sur le terrain, dans la zone principale d'extrusion, montrent que l'un et l'autre des deux types d'éruption ne relèvent pas du hasard. L'extension des deux types de laves varie le long de la dorsale. Les laves en coussins sont largement prédominantes dans la partie nord de la zone explorée, et leur proportion décroît jusqu'à cinquante pour cent vers le sud. Mais même à l'échelle d'une petite zone, on observe une rythmicité fine des deux types d'éruption.

Most of the fluid flows are associated with lava pools and with the complex morphologies found in the fields of pillars. However, there are also a few fluid flows, much less voluminous and thinner, say about one or two metres thick on average, that have the more classical appearance of the flows with roopy or folded surfaces that occur in the well known 'pahoehoe' fields of Hawaii. The rough surfaces are probably associated with rapid, lateral flow of lava and the creation of eddies in a turbulent regime. The drape-like flows commonly represent the top parts of massive basaltic units, which result from slow cooling in a static regime.

The relationships between the patterns of eruption of the fluid flows and the flows producing pillows are evidently complex. Lava pools are observed nested in the hollows of older pillow-lava terrain, pillow lavas are sometimes seen to have flowed down into the collapsed cores of pre-existing lava pools and, on fault scarps with large vertical offsets, pillow lavas may be seen to alternate with thin sheet-flows or with thicker, more massive units. In general, the field relationships seen in the principal zone of extrusion in the Cyamex area indicate that pillow lavas and fluid flows may not be randomly produced and, in some cases, it is clear that there has been fine-scale episodicity with respect to a given small area. The relative proportions of fluid flows and pillow lavas also vary from place to place along the axial zone, pillow lavas being most common in the northern part of the area visited during the expedition and making up only half of the volcanic terrain in the southern part.

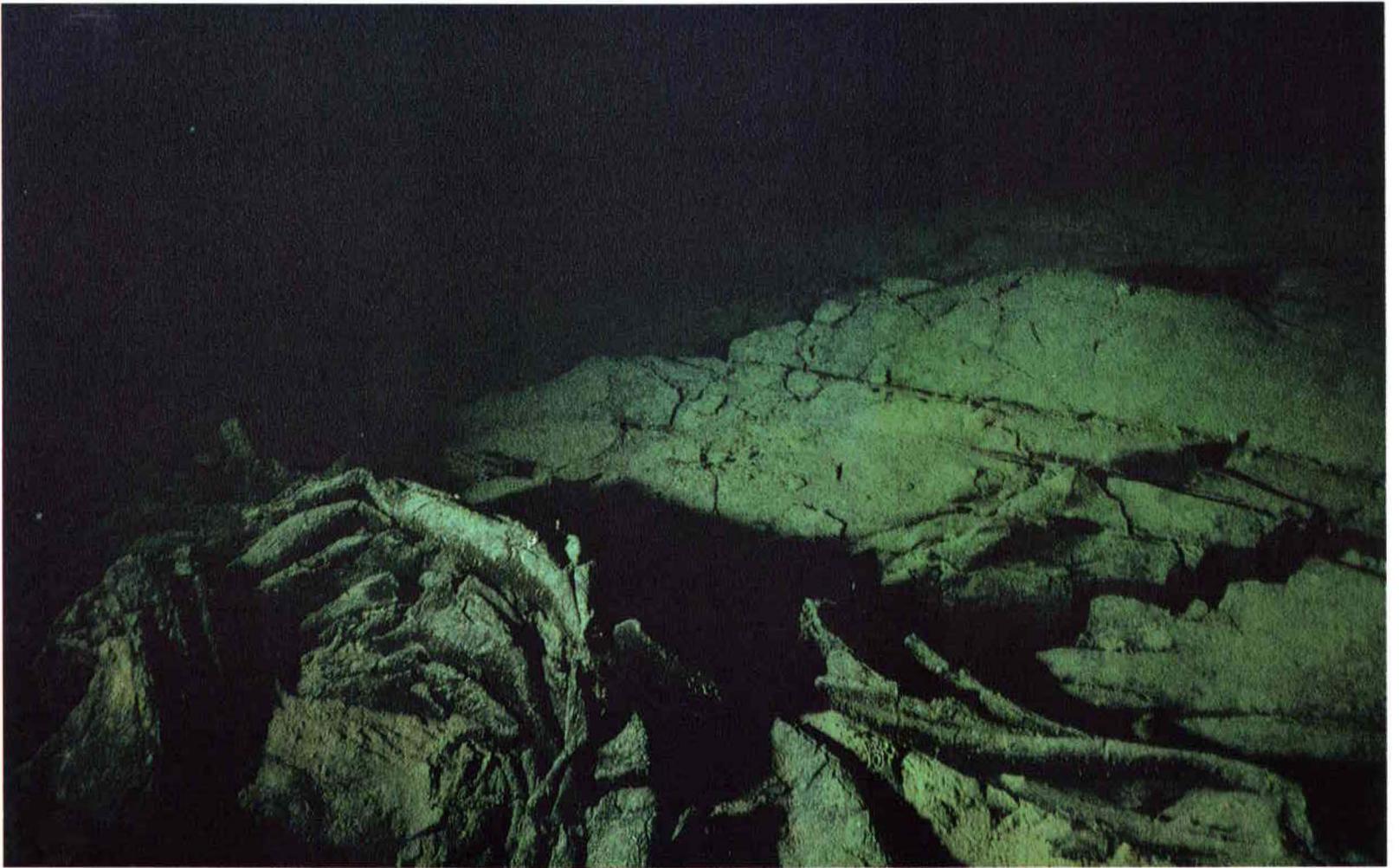


32



32. **Contact des laves fluides et des bords d'un fossé tectonique.** Le contraste est net, sur le plan de faille, entre la face stratifiée des laves fluides du lac et les formes des laves en coussins.

The fluid lavas flow into hollows and abut against older rocks, in this case a faulted wall of truncated pillow lavas. The wall of layered, fluid lava on the left is a thin sheet, slightly detached from the fault plane.



33



34

L'analyse des échantillons de roches basaltiques, recueillis par Cyana, montre que les laves en coussin sont un peu plus riches que les laves fluides en cristaux d'olivine et surtout en cristaux de plagioclase. Cependant la gamme de différenciation magmatique est très étroite et il est impossible d'invoquer des variations chimiques ou minéralogiques pour expliquer les différences de fluidité des laves. C'est probablement la décharge très rapide de gros volumes de magma qui rend compte, malgré les conditions de forte pression et de basse température des grands fonds, de la mobilité des laves fluides, ce qui leur permet d'envahir les creux topographiques et de s'y accumuler.

On peut en outre expliquer l'homogénéité remarquable de ces roches si l'on admet que le magma, qui a donné naissance à ces laves, a séjourné un temps très bref dans des réservoirs crustaux peu profonds, ce qui n'a permis que peu d'évolution par cristallisation fractionnée. Les traits principaux des laves en coussins sont compatibles avec une mise en place de volumes modestes de magma à une température avoisinant 1 200 °C. Les laves fluides, qui témoignent d'un taux de production magmatique plus élevé et de plus hautes températures, ont sans doute résidé encore moins longtemps que les autres dans les chambres magmatiques, paliers entre la région de formation du magma et celle de l'épanchement des laves.

On ignore presque tout de la distribution géographique de ces deux types de laves le long des dorsales. L'absence quasi-totale de laves fluides sur la dorsale lente de Famous avait conforté l'idée, donnée par des milliers de photographies prises à partir des navires, que l'ensemble des dorsales médio-océaniques est formé de laves en coussins. Cyamex a montré clairement que cette idée est fautive et que les coulées fluides peuvent être aussi fréquentes que les coulées en coussins. L'étude de la dorsale des Galapagos confirme cette conclusion.

Ces deux cas amènent à penser aujourd'hui que seules les dorsales rapides produisent des laves fluides. Pourquoi cette restriction ? Il est vraisemblable que l'émission instantanée de larges volumes de laves fluides implique, sous la dorsale, la proximité de réservoirs magmatiques permanents et de grandes dimensions. Or les données de la géophysique montrent qu'il en est bien ainsi dans le cas des dorsales à taux d'expansion rapide. Les laves en coussins seraient produites soit à partir de réservoirs magmatiques de volume réduit, soit lorsque le toit des chambres magmatiques s'est épaissi. Elles constitueraient donc une forme normale d'épanchement pour les secteurs lents de dorsale, sans exclure qu'elles se mettent aussi en place sur des dorsales rapides. Toute généralisation semble prématurée : ne vient-on pas de découvrir sur un tronçon de rift au sud de la zone Famous, la présence de laves fluides, en champs beaucoup plus réduits il est vrai que ceux de la dorsale du Pacifique est ?

La croûte jeune à l'axe de la dorsale enregistre les changements cycliques des types d'épanchements volcaniques, à la fois dans l'espace et dans le temps. Il reste à déterminer, par des études plus nombreuses, si cette rythmicité est le fruit du hasard, ou s'il s'agit là d'une pulsation fondamentale dans l'expansion des fonds océaniques.

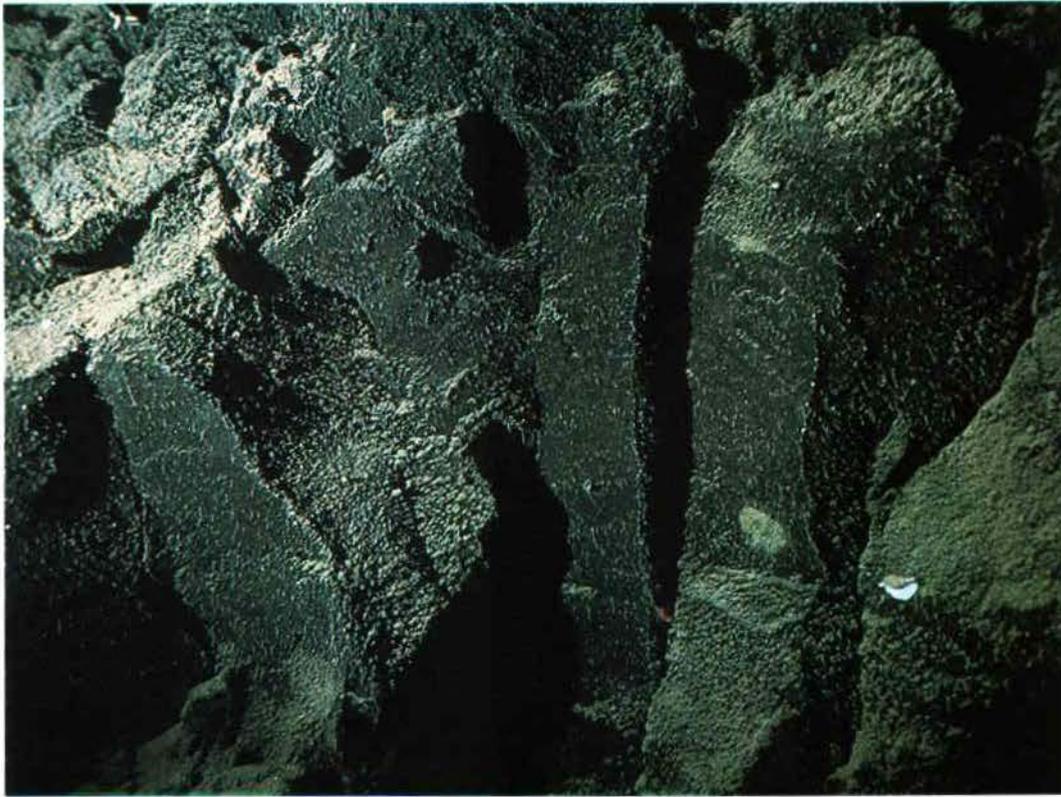
Rates of lava production

Analyses of the rock samples collected from Cyana show that the pillow lavas tend to contain a slightly higher proportion of relatively large plagioclase and olivine crystals than the fluid lavas. However, the overall spectrum of petrological variation is narrow and there are certainly no chemical or mineralogical differences that could possibly account for the different degrees of fluidity of the melts. Only the very rapid delivery of large volumes of magma can explain the high fluidity necessary for the fluid lavas to flow freely enough in the icy deep sea to be able to invade topographic lows and to accumulate there as pools. The magmas that gave rise to the relatively homogeneous basalts at 21 degrees North on the East Pacific Rise may have resided rather briefly in reservoirs at high levels in the crust and thus had little time to undergo the amount of fractional crystallization needed to produce more widely different constituent melts. The character of the pillow lavas is consistent with relatively modest rates of delivery of magma at a temperature of about twelve hundred degrees Celsius. The fluid lavas, reflecting a higher rate of delivery of magma at a slightly higher temperature, may have spent even less time than the pillow lava magmas in way-stations during their passage up from their source.

The geographical distribution of the two different lava-types along the Mid-Oceanic Ridge is still essentially unknown. During our work on the slow-spreading Mid-Atlantic Ridge in the Famous area, fluid flows were found to be rare, which contributed to the impression, gained from thousands of photographs taken from surface ships, that the Mid-Oceanic Ridge as a whole is almost devoid of such lavas. As we have seen, this idea was wrong, for on the East Pacific Rise at 21 degrees North, fluid lavas are in some places as voluminous, or at least as extensive, as pillow lavas. This is also true for the Galapagos Rise. Because both these segments of the Mid-Oceanic Ridge are associated with a spreading rate that is three times as fast as it is in the Famous area, the most obvious inference is that fluid flows are produced only on 'fast' Ridge segments. If this is correct the fluid flows may be associated with large, 'permanent' magmatic reservoirs, possibly with very thin lithospheric lids over them. These properties are, as far as we know from geophysical measurements, peculiar to fast-spreading ridges. In this interpretation, pillow lavas would be produced over small magma-reservoirs, where the rate of lava supply is relatively low, or under conditions of local thickening of the rigid lid over the magmatic source. They would thus be the typical volcanic product on slow-spreading segments of the Ridge, and could also occur on 'fast' segments. With our present knowledge, generalization is hazardous. For instance, a recent study by submersible of the Rift zone immediately to the south of the Famous Rift has led to the finding of more fluid lavas than we thought might exist in the area. However, the patches found are small compared with the East Pacific Rise fields. In general, variations in the pattern of production of pillow lavas and fluid flows in space and time are recorded in the narrow area on the East Pacific Rise where new crust is injected. It remains to be seen, however, whether the changes are ephemeral and random or have a meaningful cadence in the grand-scale context of ocean-floor growth.

33-34. **Plans et draperies.** Le sommet des coulées de laves fluides forme des surfaces planes ou plissées. Chaque photographie couvre de 10 à 20 m².

Some of the fluid lavas form planar surfaces or produce drapes and folds. The photographs cover ten to twenty square metres of sea floor.



35: Laves massives à prismation grossière. Ce sont peut-être des lacs non évités.

Some older fluid lavas, broken and dusted with sediment, are massive and blocky compared with typical pillow-lava formations. Similar flows have been cored by the drilling ship Glomar Challenger south of the Tamayo Fracture Zone.

Les roches océaniques

Hormis quelques cas d'exception, comme les zones de fracture, la croûte de la dorsale médio-océanique, qui apparaît à l'affleurement, appartient à la classe des roches volcaniques noires à grain fin connues sous le nom de basaltes tholéitiques. Ces roches sont constituées d'une matrice de verre basaltique interstitiel, à très petits cristaux, qui peut être altéré ou même dévitrifié. Les minéraux plus gros qui ont eu le temps de cristalliser dans le liquide et qui apparaissent dans la matrice vitreuse sont, dans le cas des tholéites océaniques, les trois silicates essentiels : plagioclase, olivine et clinopyroxène. Au point de vue chimique, les tholéites contiennent environ cinquante pour cent de silice (SiO_2) et une très faible quantité (un pour mille) de potasse (K_2O). Comme dans la plupart d'autres types de roche, on y trouve aussi les éléments dits majeurs : aluminium, calcium, magnésium, fer, sodium, titane, phosphore, manganèse, et aussi, à des concentrations qui ne dépassent pas le millionième ou le milliardième, des éléments en trace : nickel, strontium, terres rares, molybdène...

La minéralogie et la chimie des tholéites océaniques est particulièrement importante. C'est au droit des dorsales, là où la lithosphère océanique est la plus mince que les magmas issus du manteau supérieur ont donné naissance à ces laves. L'histoire de ces magmas qui n'ont pas traversé, comme dans les continents ou dans les bassins océaniques anciens (à Hawaï par exemple), une épaisseur importante de lithosphère, est nécessairement plus simple. Leur étude devrait donc être riche d'enseignements sur l'origine et l'évolution des magmas et même sur celles de l'intérieur de notre globe. Certains éléments majeurs, ou leurs oxydes, permettent de tester les modèles de filiation des laves entre elles, en particulier le modèle de la « différenciation magmatique par cristallisation fractionnée », qui permet de suivre l'évolution chimique du liquide basaltique au fur et à mesure qu'il cristallise les phases silicatées. Certains éléments en traces, parce qu'ils sont moins ou peu affectés par la différenciation (par exemple certaines des terres rares), sont particulièrement précieux pour tenter de remonter à la nature de la roche-mère solide qui a fourni le liquide basaltique par fusion partielle, et d'estimer le degré qu'a atteint cette fusion partielle permettant l'ascension d'un magma vers la surface. La signature isotopique des basaltes (par exemple isotopes du strontium et du plomb) forme une mémoire qui permet de déchiffrer l'histoire des fusions successives du manteau et la géographie des sources dans le manteau.

Rocks of the ocean floor

Except in certain situations, such as along some fracture zones, the exposed crust of the Mid-Oceanic Ridge is made up typically of dark, dominantly fine-grained volcanic rocks known as basalts or, more specifically, as 'tholeiites'. Basalts, in general, include a glassy matrix, which may be altered or devitrified; within the matrix, mineral grains that had time to grow in the liquid before it was erupted may be large enough to see with the naked eye. In abyssal tholeiites, the larger crystals are plagioclase, olivine and clinopyroxene. Chemically, the tholeiites, when fresh, have silicon dioxide concentrations equal to about fifty percent of the total rock by weight and very low (about one tenth of one percent) concentrations of potassium oxide. Like all rock types, these basalts also contain varying amounts, in general within a predictable range, of the major elements aluminium, calcium, magnesium, iron and sodium, and of the minor elements titanium, phosphorous and manganese. Various trace elements (for example, nickel, strontium, rare-earth elements and molybdenum) occur at concentration levels of parts per million or per billion.

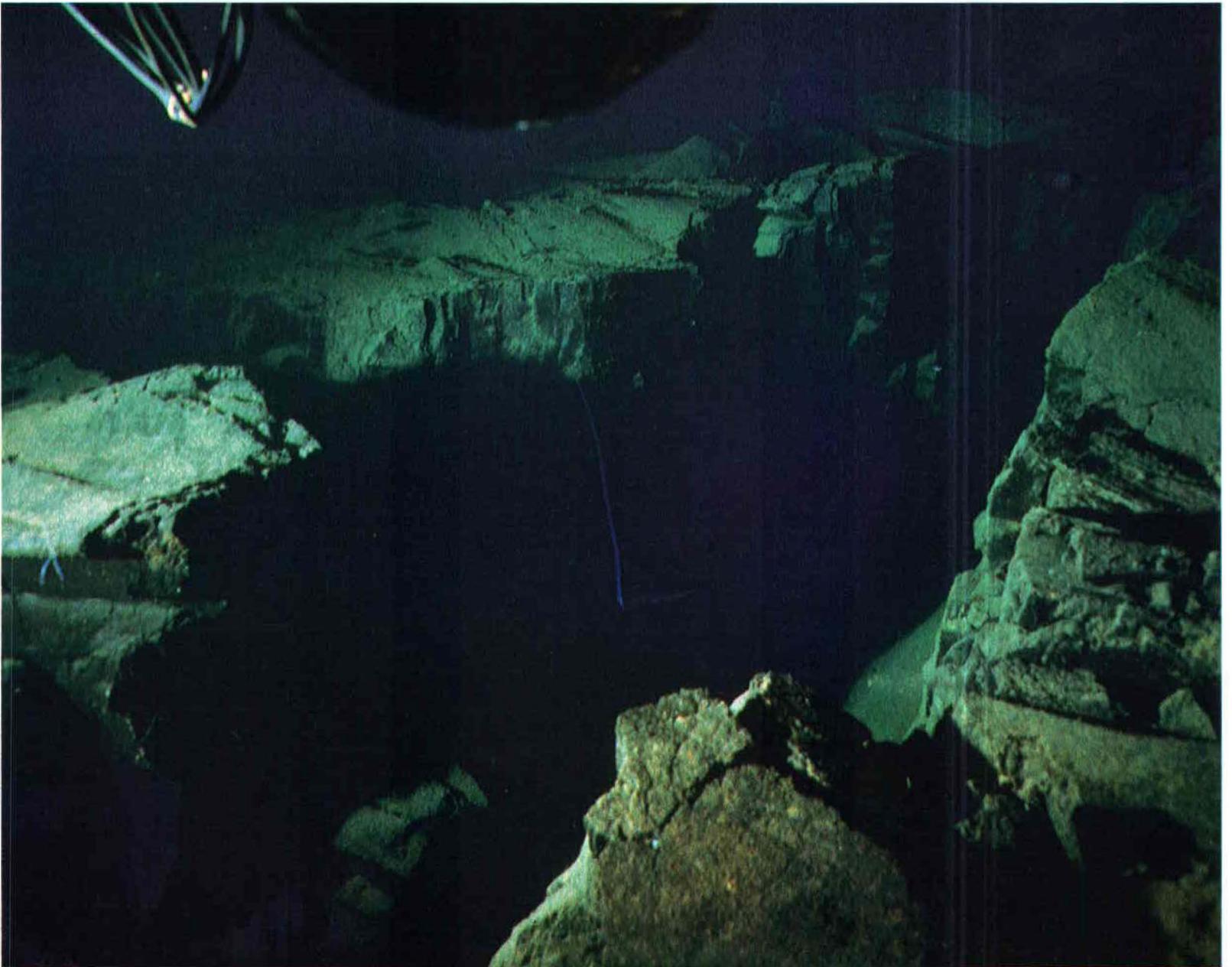
One of the chief reasons for interest in oceanic tholeiites stems from the circumstance that the magmatic liquids that form these basalts ascend from the Upper Mantle where the lithosphere is thin. Unlike the magmas that must pass through the thick lithosphere of older parts of the continents, the tholeiitic magmas of the Mid-Oceanic Ridge have a relatively simple history and studies of them may therefore more readily give clues about their origin, and about the origin and evolution of the earth's interior. The mineralogy of the basalts and the relative proportions of some of their major elements are used to illuminate aspects of their genesis, for example, the degree to which the rocks have undergone fractional crystallization, the process whereby the composition of a melt changes as minerals grow within it. The ratios of certain isotopes, such as strontium, lead and neodymium, may be used to distinguish different mantle sources of the liquid magmas. In addition, some trace elements, or ratios of them, are used in attempts to characterize mantle material, as well as for trying to establish the proportion of mantle that was melted to yield the upwardly mobile magma that gave rise to a particular basalt.

ÉVOLUTION PRÉCOCE DE LA CROUTE OCÉANIQUE

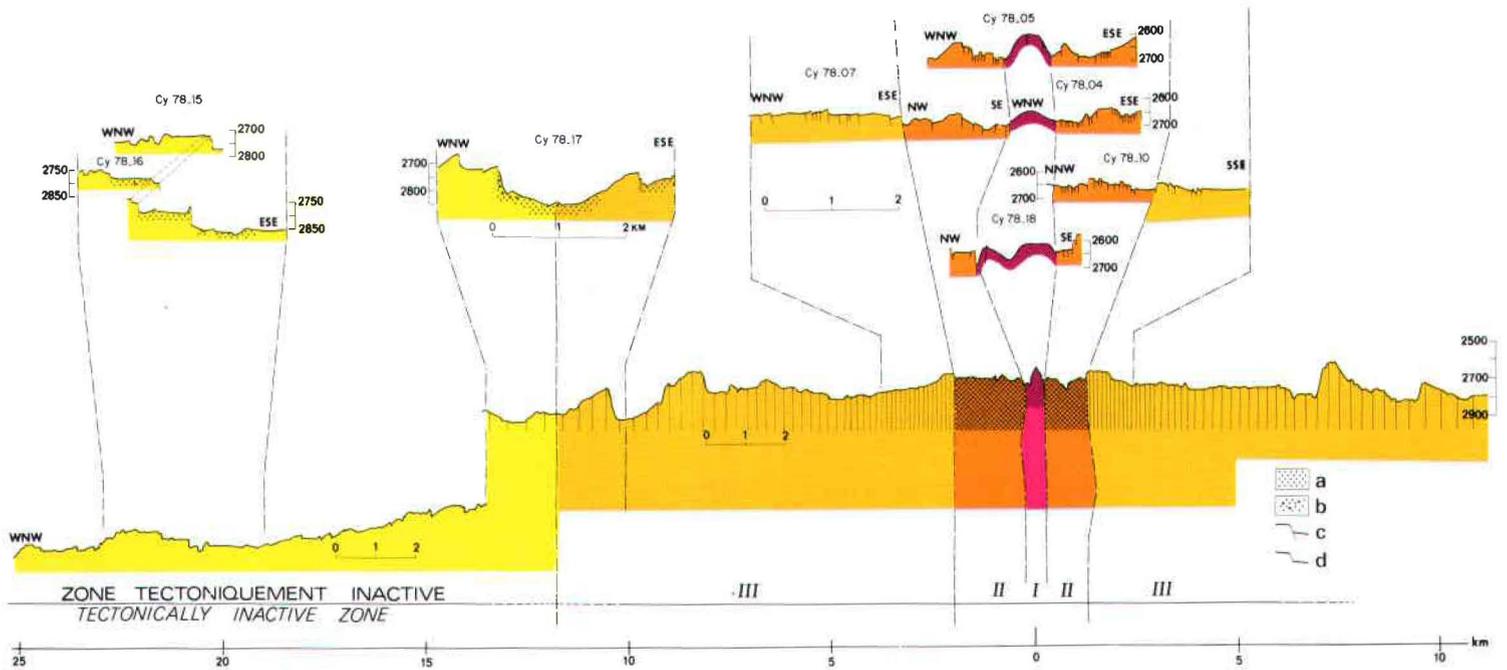
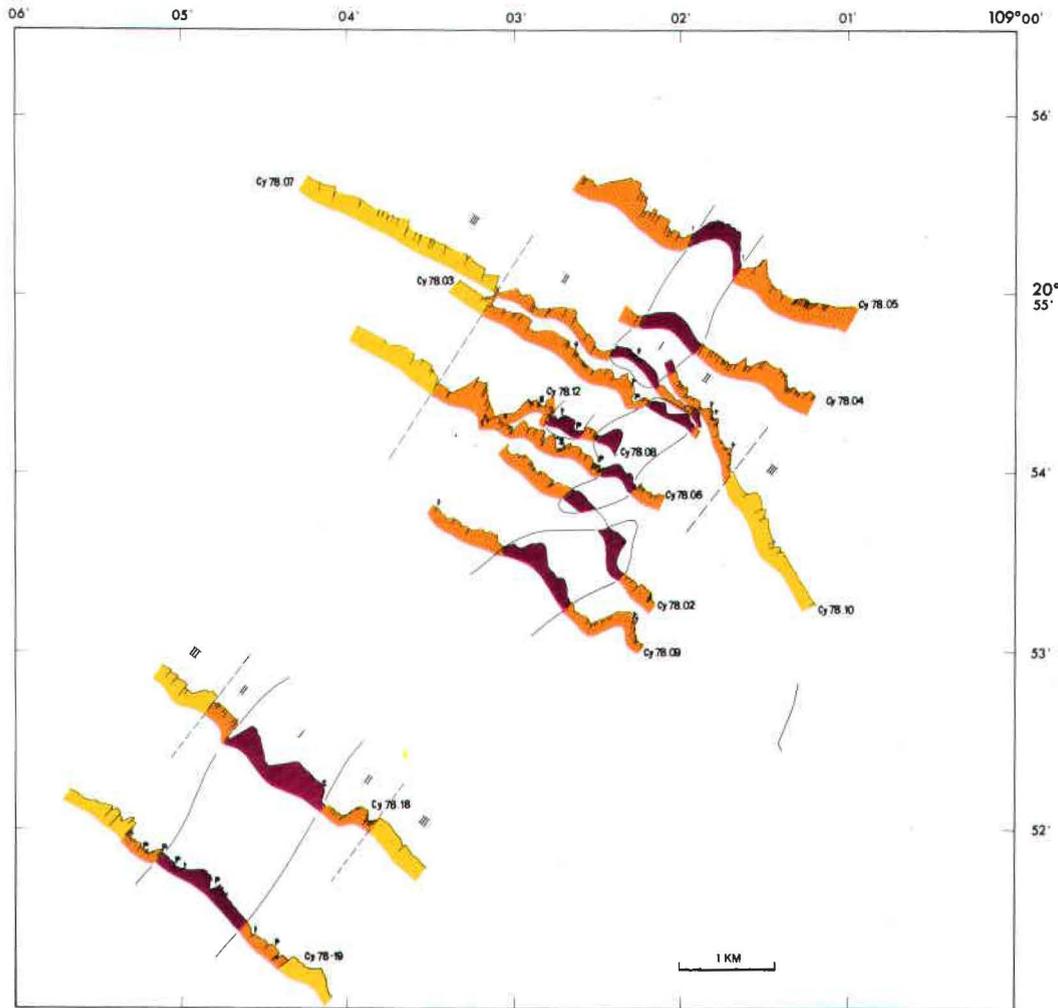
EARLY EVOLUTION OF OCEANIC CRUST

La croûte, dès sa naissance, s'altère rapidement. Les laves brillantes perdent leur éclat puis se recouvrent d'une pellicule de sédiment avant de s'enfouir définitivement. A quelques kilomètres à peine de l'axe de la dorsale, les fissures se colmatent, les failles deviennent inactives, les sources chaudes chargées de métaux se tarissent. Seule la vie se multiplie.

The surface of the new basaltic crust decays rapidly. The resplendent lavas lose their sheen, are dusted with sediment, and then buried. Even a few kilometres away from the axis of the Rise, fissures and faults become inactive, hot metal-laden springs cease, and life increases.



36



Coupes synthétiques à l'axe de la dorsale. Elles définissent la zonation géologique et tectonique établie au cours de Cyamex. Les douze plongées de Cyana à l'axe sont portées sur une carte. On voit bien la disposition en échelons de la zone d'extrusion (1). Sur une grande coupe qui aboutit, vers 21 km de l'axe, dans la zone Matuyama, on montre les limites de la zone tectonique active et les zones géologiques explorées par Cyana. a) sédiment ; b) talus d'éboulis ; c) faille active ; d) faille inactive.

Cross-sections showing the geological zonation at the axis of the East Pacific Rise. Above : The profiles from the twelve dives of Cyana shown in space. The extrusion zone (Zone 1) is in echelon. Below : long cross-section including the Brunhes-Matuyama boundary, 21 kilometres west of the Rise axis, showing the limit of active tectonics and the setting of the geological zones explored by Cyana. a : sediment ; b : talus ; c : active fault ; d : inactive fault.

◁ 36. **Fissure ouverte**, parallèle à l'axe de la dorsale, témoin de l'extension de la croûte océanique. Elle est analogue aux gias d'Islande (largeur 2' M.).

Open fissure, 2 metres wide, is proof of crustal extension in the axial area of the East Pacific Rise. Similar fissures are seen on land, for example in Iceland, where they are called «gias».

Quand on s'écarte de l'axe de la dorsale, on va au devant de paysages très différents. La coupe géologique que nous avons faite permet de distinguer quatre zones.

Dans la zone d'extrusion axiale (zone I) qui vient d'être décrite, le paroxysme tectonique est oblitéré par les épanchements de laves : failles et fissures sont recouvertes ou remplies par les laves.

Dans une ceinture étroite (zone II) de part et d'autre de cette zone axiale, une intense activité tectonique se révèle par de nombreuses fissures ouvertes et des failles actives, témoins d'une distension de la croûte.

Au delà (zone III), l'activité tectonique s'apaise, les failles s'espacent et la morphologie du fond prend un style différent.

Plus loin encore (zone IV), on ne trouve plus que des failles mortes et seulement une subsidence lente de la croûte sans fracturation. Tous ces changements dans la densité et le style des accidents tectoniques s'accompagnent d'un épaissement progressif des sédiments.

Les marques de la tectonique

Si la zone axiale est avant tout d'apparence volcanique, la seconde zone porte les marques de la tectonique. Les failles y sont innombrables. Le fond est constitué de collines (horsts) et de fossés (grabens), limités par des failles parallèles à l'axe de la dorsale. Le submersible s'élève et plonge pour suivre les traits d'un relief qui évoque les pyramides aztèques. C'est dans cette zone intensément fracturée qu'est concentré l'essentiel de l'extension visible de la croûte océanique.

Dans les grabens apparaissent encore des laves fluides à surfaces planes. Les fossés tectoniques sont des pièges privilégiés pour leur accumulation, parfois sur de grandes épaisseurs et de vastes étendues.

Lorsque le submersible se déplace le long d'un des nombreux murs de faille, l'observateur peut examiner une coupe naturelle de la partie supérieure de la nouvelle croûte océanique et étudier les relations entre les divers types de coulées. Il peut voir en particulier que les coulées à « pillows », tranchées « au couteau » par le plan de faille, montrent une structure de joints radiaux, soulignés parfois par les colorations ocre de dépôts hydrothermaux. Il peut voir aussi par endroits que les coussins à prismation radiale fruste sont recouverts par des coulées plus fluides finement stratifiées.

La base des murs de faille qui délimitent les grabens est souvent masquée par un talus d'éboulis ressemblant tout à fait, quoiqu'en plus grossier, au ballast des voies ferrées. Ces éboulis sont constitués de fragments de laves en coussins, soit détachés du front raide des coulées, soit arrachés au mur de faille par l'activité tectonique.

L'invasion des sédiments

A la limite externe de la seconde zone, les talus d'éboulis, localement recouverts de sédiments, montrent souvent une nouvelle couche d'éboulis, indiquant que les failles jouent d'une manière intermittente. En s'éloignant de l'axe de la dorsale, il apparaît que les talus sont de plus en plus ensédimentés, et que la vie se fixe. A environ un kilomètre et demi de l'axe de la dorsale, Cyana pénètre dans la troisième zone. Les traits du fond océanique changent brusquement ; on a l'impression que l'on quitte pour toujours la zone jeune. La topographie se calme, les seuls accidents sont des murs de faille, à regard interne, de vingt mètres de haut, espacés de quelques centaines de mètres par des aires planes, faiblement inclinés vers l'extérieur. Ces rampes sont couvertes, sur une épaisseur de trente à quarante centimètres, de sédiments perturbés par l'activité de holothuries et autre animaux benthiques.

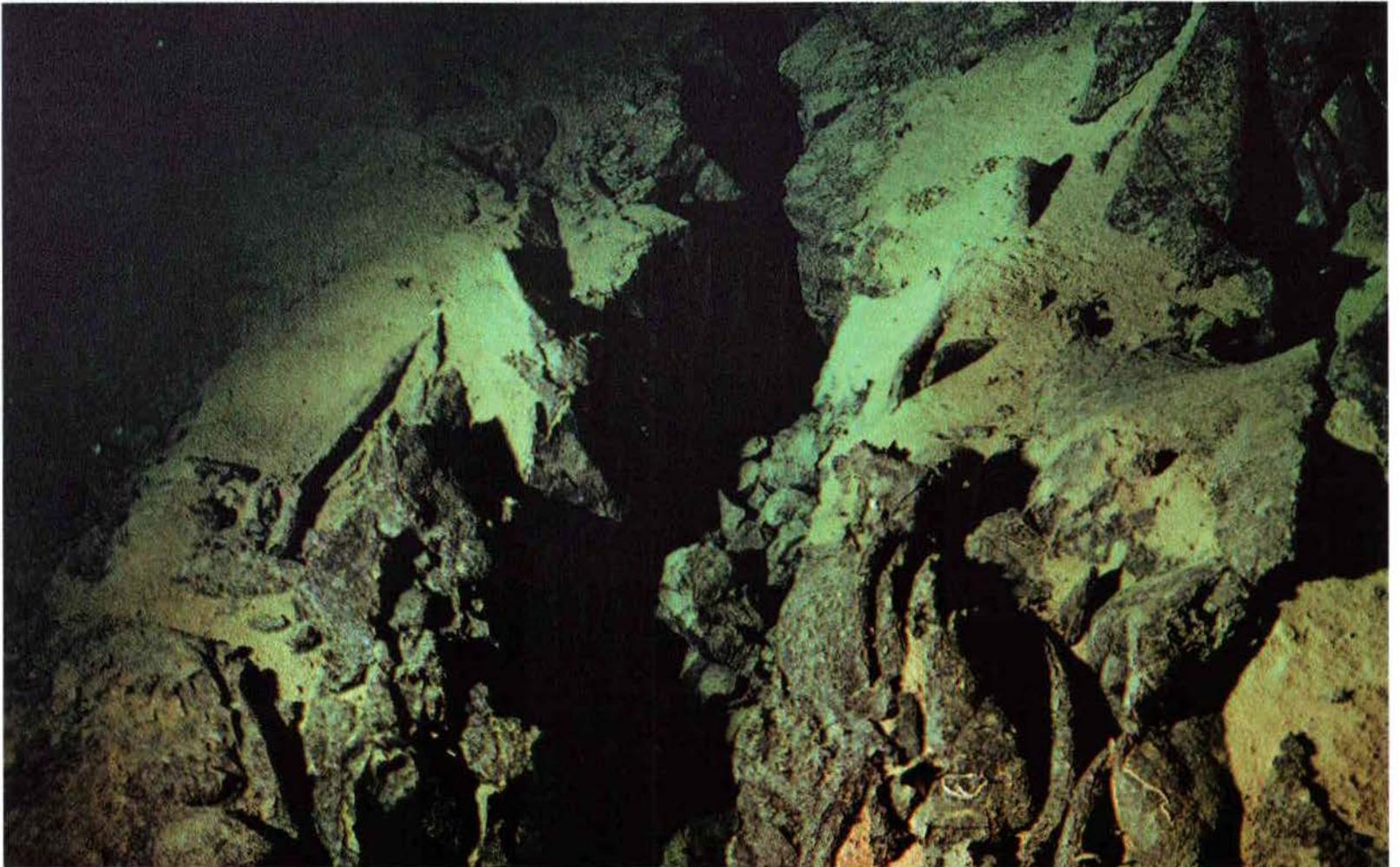
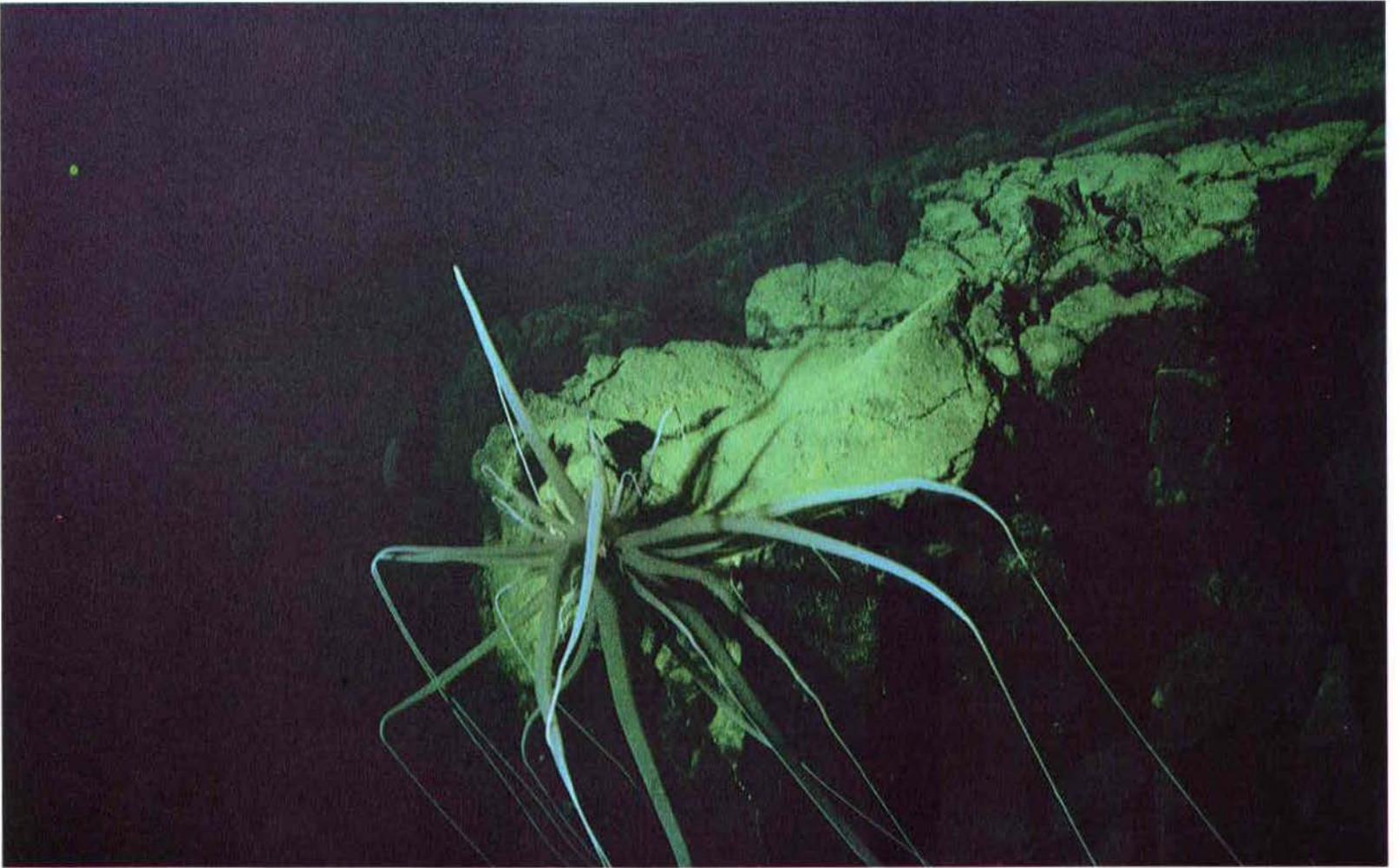
On making a traverse across the central part of the East Pacific Rise, one moves through distinctive countrysides. The youngest lavas, which occupy what can be called the 'First Zone', are flanked on both sides by narrow ribbons of quite different terrain which, taken as a pair, represent a 'Second Zone'. Here there is little or no volcanic activity and active faults and open fissures are visible and numerous. Several hundreds of metres away from the axis is a 'Third Zone', with few open fissures and where faults reflecting active crustal extension are of different pattern than that in the Second Zone. Beyond the outer borders of the Third Zone, to the west and east, we pass into tectonically dead terrain where the crust subsides slowly without fracturing. The changes in style of the visible tectonic pattern as one moves away from the axis of the Rise are accompanied by a gradual increase in the average thickness of sediment.

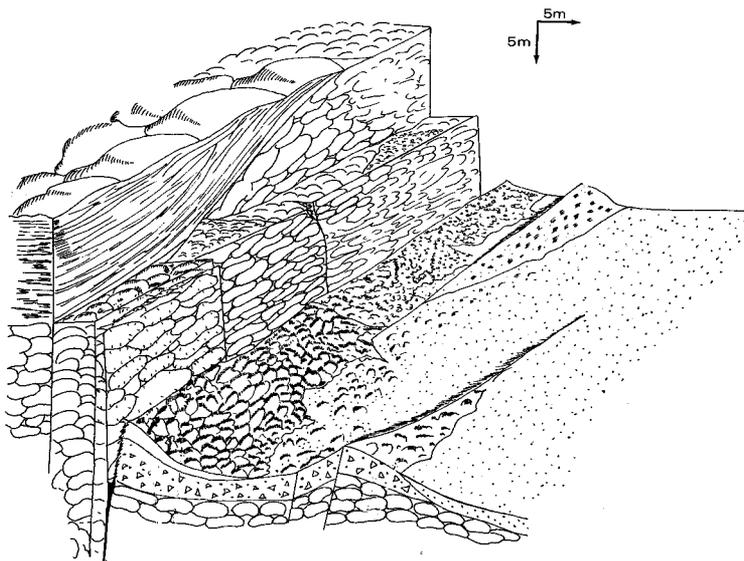
Tectonic style and the mask of sediment

The vertical offsets on the numerous faults in the Second Zone do not add up to produce high, staircase-style walls but, rather, the offsets on faults facing in towards the axis of the Rise are cancelled out by offsets on faults facing away from the axis. The result is that the faults create an up-and-down series of small staircases defining ridges (horsts) and troughs (grabens). These are all parallel with the trend of the Rise and the submersible must therefore climb and descend a succession of blocky ridges as it moves away from the axis. The ridges have flat summits and, from the submersible, the effect is similar to that of confronting a sequence of Aztec pyramids partially covered in dust. It is in this zone of closely-spaced, near-vertical faults, which are as much as twenty metres high, that the major visible part of the extension of the crust is concentrated.

The grabens of the second zone are commonly floored with flat-lying fluid lava. Indeed, the graben are clearly a preferential site of accumulation of fluid lava ; the lavas are more voluminous and cover larger areas here than they do in the central zone of youngest crust. The bases of the scarps on the sides of the graben are commonly masked by rubble or talus, resembling the ballast of a railway track although, for the most part, a good deal coarser. The talus is made up typically of fragments of pillow lava that have tumbled down from lava flow-fronts, or that were torn from them by the violent motion on faults. As the submersible moves along one of these faulted scarps, the geologist can examine a natural cross-section of the uppermost part of the new crust, and can study the relationships between different volcanic flows. He can see, for example, that exposed pillows, sliced as sharply as if by a razor, exhibit an internal pattern of radial jointing, emphasized in places by colour-staining caused by hydrothermal mineralization. In places, the observer sees that the radially-jointed pillows are covered by finely stratified flows representing the more fluid type of lava.

The average thickness of sediment in the youngest parts of the horst-and-graben zone is only several centimetres. Towards the edges of the zone, the sediment cover is thicker and supports more benthic macrofauna than live on the younger rocks close to the axis. Furthermore, near the edges of the Second Zone, sediment-covered talus sometimes has new talus shed on top of it, indicating that fault activity is intermittent and that dormant faults can be reactivated. Going still further from the axial zone, the talus piles appear to be more and more sediment covered and there are fewer accumulations of fresh rubble.





Génération de talus d'écroulements. (croquis) Ils sont séparés du mur de faille par une fissure ouverte au sommet, les laves fluides à surface lobée fossilisent les coussins anciens.

Faulting in pillow terrain. Talus piles of several generations are separated from the main fault-plane by an open fissure. The walls expose a succession of flows. Big sheet-flows with a lobate roof cover older pillows.

A environ cinq kilomètres de l'axe, de vastes étendues planes et ensédimentées, de un à deux kilomètres de large, séparent quelques rares structures tectoniques, qui font apparaître le socle basaltique, et marquent les failles encore actives. A douze kilomètres de l'axe, aux limites de la troisième et quatrième zone, presque toutes les failles sont fossiles. A vingt et un kilomètres enfin, à l'endroit où le dernier événement d'inversion de polarité magnétique est enregistré dans les roches (inversion Brunhes-Matuyama), aucune trace d'activité tectonique n'a pu être détectée par Cyana.

L'épaisseur des sédiments est très variable, car ils s'accumulent dans les creux et ne forment qu'un film très mince sur les pentes abruptes. Localement, le sédiment peut atteindre vingt mètres d'épaisseur, si l'on en juge par des profils de sismique réflexion obtenus en 1968, au cours d'une expédition de la Scripps Institution of Oceanography. L'épaisseur moyenne des sédiments, dans la zone d'inversion Brunhes-Matuyama, est plutôt de l'ordre de la dizaine de mètres, ce qui donne un taux moyen de sédimentation de un centimètre à un centimètre et demi par millier d'années, pendant les 700 000 ans de l'époque magnétique Brunhes. Ce taux est tout à fait normal pour le type des sédiments déposés et il rend compte de l'épaisseur de l'ordre d'un mètre à quelques kilomètres de l'axe de la dorsale, là où l'âge de la croûte est d'environ 100 000 ans. Lorsqu'on s'éloigne de l'axe, la couverture sédimentaire adoucit les pentes, enterre le pied des failles et des talus et provoque un lissage de la topographie.

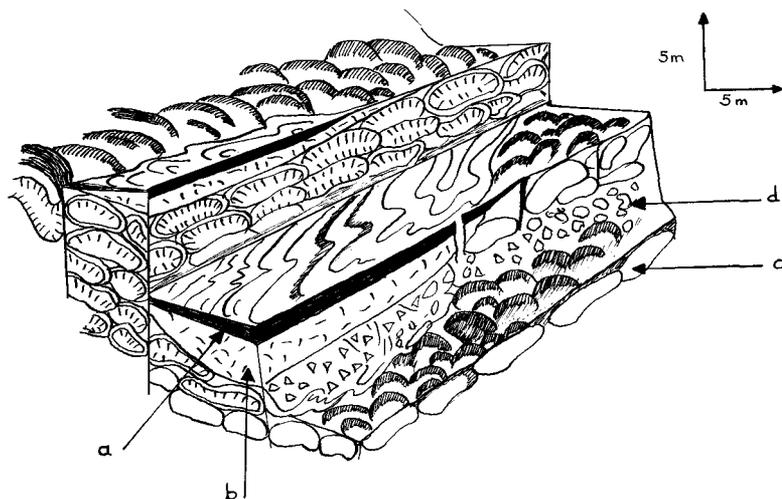
Moins spectaculaires que les variations transversales qui viennent d'être décrites, les variations longitudinales sont cependant notables. En particulier, les coulées fluides qui remplissent partiellement les dépressions tectoniques dans la zone des horsts et grabens (zone II) sont beaucoup plus

37. **Champ de fissures.** Sur une arête, un actiniaire.

Large actinarian rests on the edge of a block of young, fissured lava.

38. **Fissure ouverte dans les laves fluides.** Le sédiment recouvre partiellement les bords, son absence au fond suggère qu'elle est récente.

An open, sediment-free, and possibly still active fissure cuts through fluid lavas partially covered with sediment.



Croquis, géométrie de laves fluides (a) sur une unité de laves massives (b), reposant sur des laves en coussins (c). Talus d'écroulements (d) au pied du mur de faille inférieur.

Field relationships of fluid flows (a) on top of a level surface of down-faulted massive flows (b) with pillow lavas (c). A pile of rubble (d) lies at the foot of one of the scarps.

At a distance of about one and a half kilometres from the Rise axis, the submersible passes into the Third Zone and crosses a series of parallel faults, up to twenty metres high facing consistently towards the axis of the Rise. The whole character of the sea floor is now very different and one has the first distinct impression that it is no longer youthful. The steep, faulted walls here are separated by gentle, outward-inclined ramps covered by sediment thirty to forty centimetres thick and stirred up by the quite common holothurians and other bottom-living creatures that live in this area. The submersible moves rapidly over the sediment-smoothed surfaces and only occasionally encounters outcrops of the lava formations hidden beneath the mask of sediment.

The active faults become progressively more widely spaced towards the outer borders of the Third Zone. About five kilometres away from the axis, extensive areas of flat-lying sediments, one to two kilometres across, separate the relatively bare rock-outcrops marking faults that are still active. At twelve kilometres from the axis, at the outer edges of the Third Zone nearly all of the faults are quiet; and at twenty-one kilometres, in the area corresponding to the boundary between the Brunhes and Matuyama Magnetic Epochs, only dead faults with sediment-covered talus scarps were observed. The thickness of sediment here is very irregular, with accumulations in the troughs and a thin cover on the steep slopes. The maximum thickness of sediment in the troughs is about twenty metres judging from seismic reflection profiles made during a 1968 Scripps expedition to the area; the mean thickness is probably closer to ten metres. Since the age of the crust at the Brunhes-Matuyama boundary is 700 000 years, the implication is that the average sedimentation rate has been approximately one to one and a half centimetres every thousand years. This rate is of the expected order of magnitude for the type of sediment being deposited, and is compatible with the observation that the sediment thickness is not much more than a metre a few kilometres away from the axis of the Rise, where the crustal age is, say, 100 000 years. In general, then, as one moves away from the axis, the blanket of sediment gradually diminishes slopes, buries the lower slopes of scarps and the associated talus, and produces a smoothing in detail of the regional profile across the Rise.





41

◁ 39. **Laves en coussins tronquées.** Les cavités peuvent servir à orienter les laves. Le sédiment a été remis en suspension par Cyana.

The submersible stirs up sediment lying on truncated pillows. The large cavities inside the pillows can be used to orient them for rock magnetic studies.

◁ 40. **Féerie sous-marine,** dans le mur de faille tous les coussins ne sont pas tronqués.

Truncated and stained pillows on a fault plane abutting pillows that have not been cut by faulting and still have glass on their surfaces.

Les chiffres en bas à gauche indiquent. *The numbers give :*

● l'heure	● the time in hours	13 h. 14 m. 10 s.
● le cap	● the heading of the submersible	24° N
● La profondeur	● the water depth	2 470 m.
● l'altitude au-dessus du fond	● the altitude of the submersible above the sea floor	6.30 m.

△

41. **Palette de couleurs sur un mur de faille.** La coupe révèle l'agencement de la pile de laves, tachées par des émanations hydrothermales.

Cross-sections of pillow piles are seen on steep walls produced by high-angle faults which cut through the lavas. Hydrothermal stains colour the pillows.

43. **Créneaux de lave colorée sur le point de se détacher au sommet d'un mur de faille.** ▷

At the summit of a fault-plane. A stained, broken pillow of lava, fractured and ready to break off, will enrich the talus at the foot of the cliff.

44. **Champs d'éboulis.** Le bras de Cyana saisit un bloc de laves en coussins. ▷

Cyana samples fresh talus. The pillow fragments resemble oversized railway ballast.

▽ 42. **Prélèvement d'une roche au bord d'une fissure ouverte à la base d'une faille.**

Cyana takes a sample from the lip of an open fissure at the base of a fault-scarp.

42



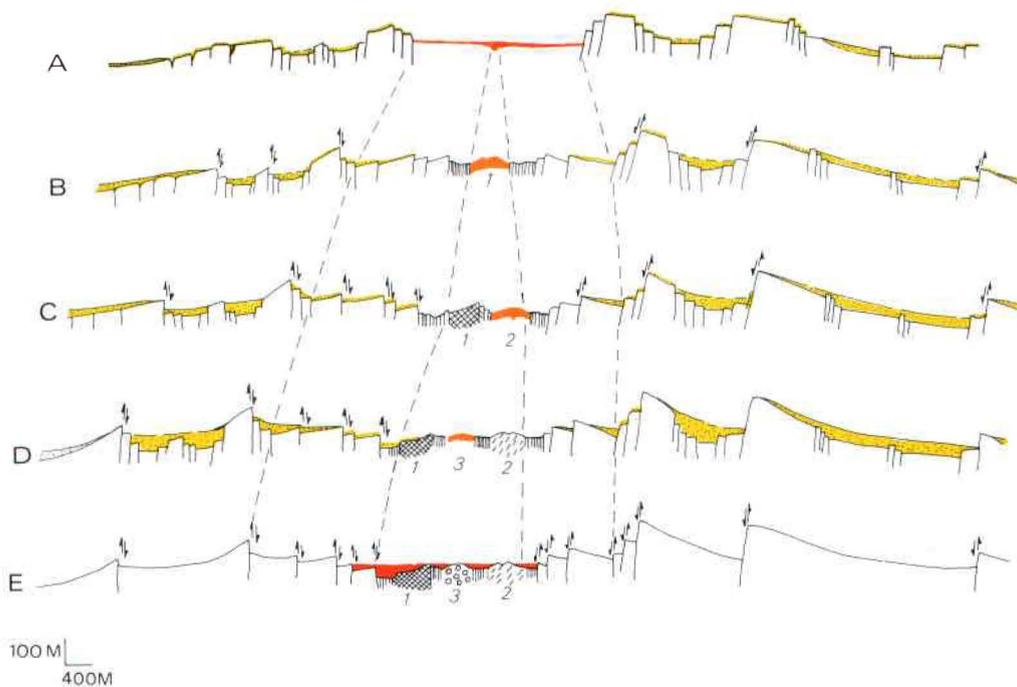




45

45. Laves fluides en feuillets au bord d'un escarpement.

Fluid-lava sandwiches at the edge of a fault scarp.



Coupes structurales à la crête de la dorsale. Elles montrent une évolution (de haut en bas) : ennoyage de la zone axiale par les laves fluides, construction de volcans fissuraux qui passent des positions 1 à 3 au cours de cycles successifs d'épanchement, ennoyage partiel des rides de laves en coussins par des nouvelles venues de laves fluides, ensevelissement lent des régions externes sous les sédiments.

Structural and bathymetric sections across the crestal area portray the evolution of the East Pacific Rise at 21° North.

From top to bottom : flooding of the axial zone by fluid lavas ; building of fissural volcanoes, jumping from positions 1 to 3 during new cycle of pillow-lava effusion ; partial flooding of the pillowed topographic highs in the axial zone during a new cycle of fluid-lava production ; progressive burial and smoothing of outer areas under a cover of pelagic sediment.

développées dans la partie sud de la zone Cyamex que dans la partie nord. Au nord, elles ont quelques dizaines de mètres de large ; au sud, elles s'étalent sur des centaines de mètres et ont complètement ennoyé les terrains intensément fracturés. La répartition et la densité des failles varient aussi lorsqu'on se déplace dans la seconde zone parallèlement à la dorsale, et une certaine dissymétrie existe de part et d'autre de la zone axiale. Ainsi la densité de ces failles est-elle nettement plus grande dans la partie sud-est du secteur exploré par Cyamex. Au nord-ouest en revanche, les failles sont plus espacées et ont épargné une bonne partie des constructions volcaniques primaires créées à l'axe. Il est ainsi possible de comparer les anciens édifices volcaniques aux nouveaux.

Largeur de la zone active

C'est la première fois que l'on détermine, par des arguments de terrain, la largeur de la zone tectonique active à l'axe d'une dorsale médio-océanique. Cette observation est donc très importante. Au cours des plongées sur la zone Famous, il n'avait été possible d'explorer que les premiers escarpements qui forment la base des murs de la vallée du axiale, et la limite externe de la zone tectonique active n'avait pu être déterminée. Sur la base de plusieurs arguments, tous indirects, comme la distribution des tremblements de terre et la morphologie de la vallée, on peut estimer que l'activité tectonique s'étend, dans la zone Famous, au-delà des bords de la vallée sur une distance totale d'au moins trente-cinq kilomètres. Dans la zone Cyamex on arrive, par raison de symétrie, à une largeur totale de vingt-quatre kilomètres pour la zone tectonique active. Ce chiffre coïncide peut-être avec la largeur de la chambre magmatique que l'on suppose présente sous l'axe de la dorsale. Sur la foi des modèles thermiques développés pour les zones axiales des dorsales et de la mise en évidence directe de l'atténuation des ondes sismiques, on aboutit à une estimation analogue pour la largeur d'une chambre magmatique. Il est possible que les grandes failles, qui forment les premières collines abyssales bien marquées aux limites de la zone tectonique active, soient produites par effondrement épisodique de la croûte au-dessus de la chambre magmatique, à la manière des escarpements subverticaux que l'on trouve autour des calderas terrestres.

Une expansion discontinue ?

Les plongées Cyamex dans les zones éloignées de l'axe ont soulevé un autre problème. C'est à l'axe de la dorsale que s'est mise en place la croûte que l'on trouve maintenant à dix, cent ou mille kilomètres de cet axe. Cette croûte a été emportée, comme sur un tapis roulant, sur le dos des gigantesques plaques de lithosphère qui migrent continuellement. Comment peut-on expliquer, en régime permanent, que le terrain très accidenté de la zone axiale passe aux mornes plaines ensédimentées de la troisième zone ? La réponse est peut-être que des quantités très importantes de laves fluides peuvent se mettre en place dans l'étroit couloir où la croûte océanique est créée. Les laves fluides envahiraient alors de grandes étendues du fond océanique et nivelleraient presque complètement les collines volcaniques construites par des laves en coussins. Dans certains cas, les laves fluides auraient pu couvrir une surface beaucoup plus importante qu'aujourd'hui dans la zone des horsts et grabens, et même jusqu'aux limites de la zone III. Les grandes étendues planes, que l'on rencontre aujourd'hui loin de l'axe, pourraient donc représenter les surfaces d'anciens lacs de lave, et les rides qui s'élèvent au dessus des plaines pourraient être les sommets de collines constituées de laves en coussins qui émergeaient telles des îles dans un océan de basalte liquide. Ces hypothèses sont en accord avec les deux modes possibles d'extrusion pour ces laves.

Although less spectacular than the differences of terrain across the trend of the Rise, there are important longitudinal variations. For example, the fluid flows partially filling the tectonic depressions in the second zone are more extensive in parts of the southern section of the Cyamex area than they are in the northern section. In the north, the flows are up to a few dozen metres across ; in the south, they can be as much as several hundreds of metres wide and have, in places, almost entirely submerged the fractured landscape that must once have existed. There is also considerable longitudinal variation in the fault pattern in the second zone. Faults are more widely spaced in the northern part of the area and one of the consequences of this is that the original shapes of many lava piles can still be recognized, and compared with the shapes of volcanic features now being built at the axis of the Rise.

The observation that the faults are dead beyond about twelve kilometres from the Rise axis is the first field evidence of the width of the zone of active tectonics along any portion of the Mid-Oceanic Ridge. During the work in the Famous area in the Atlantic, only the deepest of the steep, formidably high scarps on the inner walls of the Rift Valley were crossed by the submersible, and the outer limit of the zone of active tectonics was never tied down. From various lines of evidence, most of it indirect — the distribution of earthquakes and sea floor morphology, for example — we can only surmise that tectonic activity in the Famous area may extend out to beyond the edges of the thirty-five kilometre-wide rift valley. In the Cyamex area, where faulting stops about twelve kilometres to the west of the Rise axis, the tectonically active zone can be taken confidently to be about twenty-four kilometres wide if bilateral symmetry is assumed. This measurement may correspond to the width of the magma chamber that is believed to be present beneath the crest of the Rise. The same estimate has been arrived at on the strength of thermal models and of evidence from the attenuation of seismic waves. One possibility is that the large faults that produce the first prominent abyssal hills at the edges of the active tectonic zone of the Rise are generated by intermittent collapse of crust over the magma chamber. If so, this would be analogous to the production of steep scarps at the rims of volcanic craters on land when their central magmatic reservoirs founder.

Instantaneous spreading rates

The dives that were conducted away from the axial zone highlighted another important question. Crust that is now ten, twenty, one hundred or one thousand kilometres away from the axis of the Rise was originally emplaced at the axis. It has travelled on top of the plates of lithosphere that have migrated continuously away from the axis. How then, in this dynamic regime, was rough hilly terrain, such as we associate with the axial zone of the Rise, transformed into the relatively flat plains of the Third Zone ? One possible answer may be that particularly large supplies of fluid lavas are sometimes erupted in the narrow axial corridor where the new crust is created. The fluid lavas might then flood wide expanses of sea floor and bury most of the volcanic hills built by pillow lavas. They could, at times, have covered much bigger areas of the horst-and-graben terrain than they do today, perhaps all the way up to the scarps at the inner limits of the Third Zone. The wide, flat plains now found away from the axis may thus be the surfaces of old lava-pools, and the ridges rising above the plains may be the summits of pillow hills that once stood as islands in a sea of molten basalt. These inferences would be support for the notion that the extrusion process works in two modes : dominant pillow lava, produced

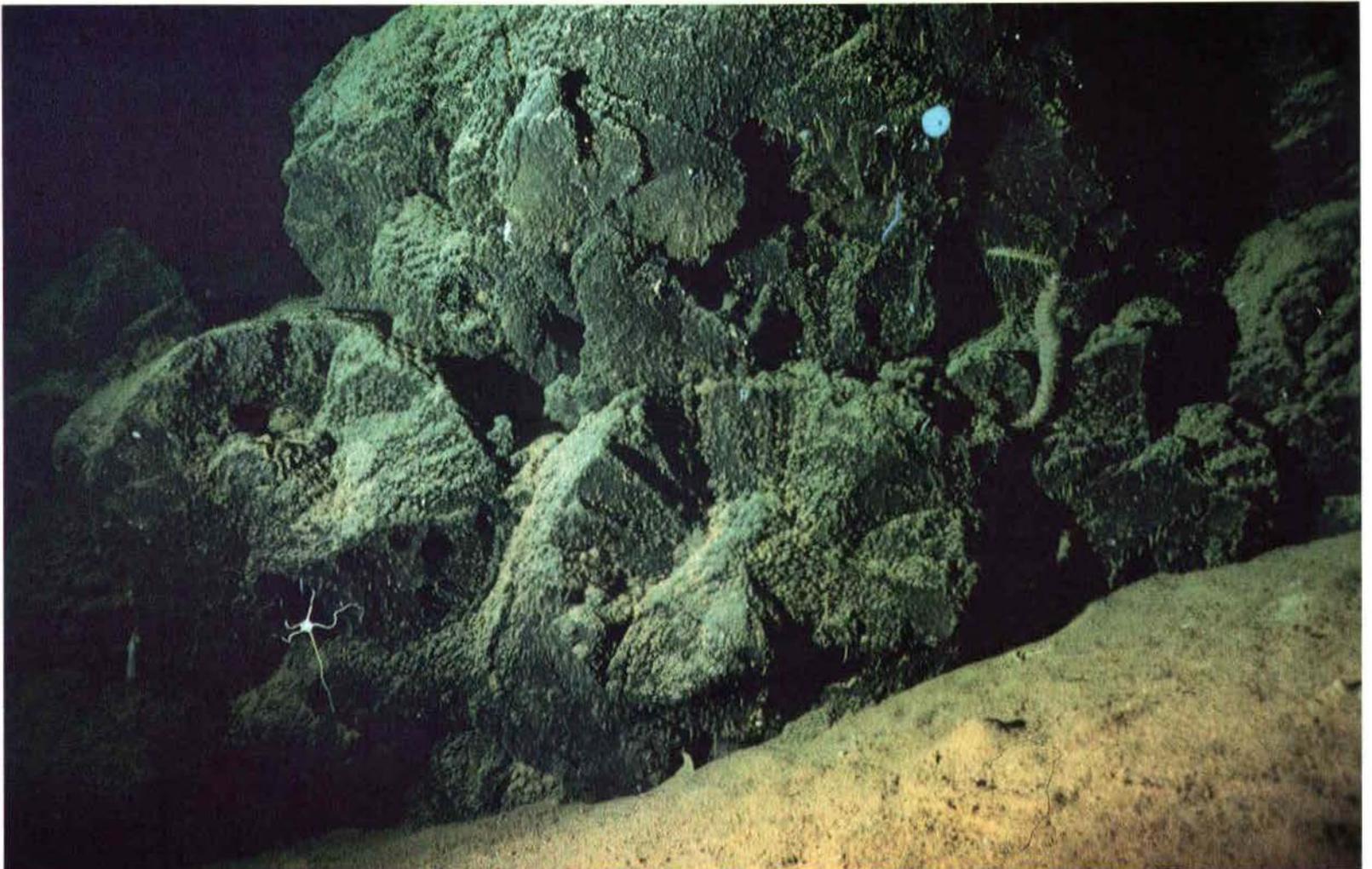
Ceci nous conduit à envisager un processus discontinu pour l'expansion des fonds océaniques. Les taux d'expansion (couramment cités : six cm par an pour la zone Cyamex, deux cm par an pour la zone Famous), correspondent à des déplacements calculés sur un à plusieurs millions d'années à partir des anomalies magnétiques. Mais quel est le régime de l'expansion pour des intervalles de temps plus courts, sur dix ans, un siècle ou plusieurs millénaires ? On ne peut répondre puisque l'on ne sait pas dater des événements aussi brefs. Une exception est la méthode des traces de fission, qui s'applique bien aux verres volcaniques. La densité des traces laissées par la désintégration spontanée des nucléides radioactifs, comme l'isotope de l'uranium U-238, est proportionnelle au temps qui s'est écoulé depuis que le verre s'est refroidi au-dessous de 100°C environ. Ces mesures sont malheureusement très laborieuses, et il en existe peu. Une autre possibilité, encore peu explorée, est celle de la paléontologie classique pour dater les sédiments à la crête de la dorsale, mais ceci demande un échantillonnage difficile pour éliminer les complications dues à l'instabilité des sédiments et à leur redistribution par les courants profonds.

Si la croissance apparemment régulière du fond de l'océan Pacifique s'avère être un processus discontinu, la présence de laves fluides peut être le témoin d'une phase d'ouverture rapide pendant un bref instant du temps géologique, par exemple cent mille ans ou moins, pouvant alterner avec des phases d'expansion plus lente favorisant la mise en place de laves en coussins. Les chercheurs sauront peut-être un jour établir une corrélation entre la morphologie du plancher océanique dans ses parties jeunes ou anciennes et d'une part les taux de production des laves, d'autre part les vitesses précises d'expansion. Ils sauront aussi relier la logique des périodicités volcaniques et tectoniques avec les mécanismes internes du globe.

when the average rate of upwelling magma is low, and dominant fluid lava, produced when it is high. This notion, in turn, leads to the question of plate-separation rates over relatively short periods of time.

It is possible that the Ridge grows in bursts : the opening rates that are normally cited are derived from the magnetic time scale and correspond to average displacements over about one or several million years. The regime within shorter time spans is unknown because one does not have a convenient way to find the absolute ages of events of such fleeting duration. A partial exception is the fission-track dating method which works well on fresh submarine glasses. The density of the tracks made in basaltic glass by radioactive nuclides produced by the spontaneous fission of the Uranium isotope U-238 can be used to specify quite precisely the time that has elapsed since the glasses cooled below a hundred degrees Celsius, but the measurements are laborious to make and few exist. A potentially more accurate method would be to date the sediments lying on new or young lavas at the crest of the Mid-Oceanic Ridge.

If the apparently steady growth of the Pacific is a discontinuous process, then the presence of abundant fluid lavas may be symptomatic of a relatively rapid sea-floor spreading rate at a given 'instant' of geological time, say a hundred thousand years or less. Phases of slower sea-floor growth may favour the production of pillow lavas. Perhaps scientists will eventually be able to correlate more evolved as well as younger sea-floor morphologies with rates of lava production and with accurate plate-separation rates. And perhaps they may be able to link rhythms of tectonic and volcanic episodicity with other fundamental patterns in the way the earth behaves.



Les sédiments à la crête de la dorsale du Pacifique Est près de 21° N

Presque tous les sédiments que nous observons à travers le hublot de Cyana sont constitués de fins débris des parties dures, ou tests, du « plancton », ces êtres microscopiques qui pullulent tout près de la surface de la mer. Les sédiments détritiques d'origine continentale ne peuvent pas atteindre les parties élevées de la dorsale : ils se déplacent en effet par transport au ras des fonds marins, et restent piégés dans les bassins étroits situés entre la dorsale et le talus continental ouest-américain. Les seuls sédiments continentaux qui pourraient l'atteindre sont des particules éoliennes de diamètre inférieur à 0,1 mm, et peut-être des débris très fins transportés en suspension à faible profondeur. Il s'y ajoute localement les produits de la désintégration et de l'altération chimique des basaltes et de leurs écorces vitreuses, ainsi que des minéraux précipités dans l'eau de mer à la suite de décharges hydrothermales.

Le plancton, qui alimente donc l'essentiel des sédiments dits « pélagiques » des grands fonds océaniques, comprend d'une part des organismes à tests (ou squelettes) carbonatés, comme les foraminifères ou les algues microscopiques du type Coccolithophoridae, d'autre part des organismes à test siliceux (opale), comme les radiolaires. La proportion de tests d'origine planctonique dans les sédiments pélagiques dépend non seulement de la densité de leur population en surface, qui varie elle-même en fonction de la production primaire, mais aussi de leur degré de dilution par des sédiments d'origine continentale, et de leur degré de dissolution dans les eaux froides et corrosives des profondeurs océaniques. Dans le cas de la dorsale du Pacifique Est, les sédiments se déposent au-dessus de la profondeur critique, ou de compensation, pour le carbonate de calcium, profondeur à laquelle ce carbonate n'est plus stable et se dissout. Les tests calcaires de foraminifères, accompagnés de restes de radiolaires, constituent donc une proportion importante du sédiment total.

La dimension des tests individuels peut varier de quelques dixièmes de millimètres à quelques millimètres : cimentés par les plus fins constituants du sédiment d'origine continentale, ils constituent une « boue pélagique » typique, de teinte très pâle, douce au toucher mais rugueuse sous la dent, et contenant une grande quantité d'eau interstitielle avant son enfouissement. Sur le fond marin, le sédiment devient un peu brunâtre, sur quelques centimètres en raison d'une oxydation à l'interface eau-sédiment. Le léger saupoudrage que l'on voit sur les laves les plus jeunes provient de cette « pluie » continue de particules planctoniques qui tombent doucement depuis la surface et qui sont dispersées d'une manière plus ou moins homogène dans la masse d'eau de mer en arrivant sur la plancher océanique. Une fois sur le fond, le sédiment a bien des chances d'être perturbé : il peut être remanié par gravité, glisser sur les pentes fortes et s'accumuler sur des pentes plus faibles ou sur le fond des grabens, ou encore dans les trous et fossés qui accidentent les pentes elles-mêmes. Dans d'autres cas, le sédiment peut être remanié par des courants de marée et par les courants profonds qui balayent les fonds océaniques. Nous offrons ici une galerie de portraits des organismes fouisseurs benthiques qui facilitent ce remaniement et qui remettent en suspension une partie des sédiments pélagiques.

Sediments on the crest of East Pacific Rise near 21 degrees North

Most of the sediment seen through the portholes of Cyana is made up of what remains of the hard parts of planktonic organisms that lived near the surface of the sea. Sediments that result from the erosion of continental rocks, and that find their way into deep water by transport close to the sea floor, cannot reach the high-standing parts of the Rise because they would be trapped in the narrow basin lying between the Rise and the submarine slopes of the Americas. The only land-derived materials that can contribute to the sediment blanket observed in the study area are wind-blown particles, typically smaller in size than about 0.1 mm, and very fine debris that is carried in suspension at relatively high levels in the water mass. Furthermore, there are additions to the sediment carpet following the mechanical disintegration and chemical weathering of the basaltic rocks and their glassy skins, and of precipitations from sea-water that is saturated with elements of hydrothermal origin.

The plankton that provides sediment for the ocean floor includes the foraminiferal fauna and the microscopic coccolithophoridae, both of which build their tests out of the calcium-carbonate mineral calcite, and the radiolarian fauna whose lace-like hard parts are made up of opaline silica. The proportion of the planktonic tests in deep-sea sediments depends not only on the living populations, which in turn vary from one part of the ocean to another according to the primary food supply, but also on the degree to which they are diluted by continent-derived sediments and the extent to which they are dissolved in the cold, high-pressure environment of the deep sea. The study area on the East Pacific Rise crest is slightly above the depth at which undersaturation of calcium carbonate in the water column is sufficient to lead to rapid dissolution ; and foraminiferal tests, accompanied by radiolarian remains, make up an important fraction of the total sediment.

The individual planktonic tests vary from a fraction of a millimetre to more than a millimetre in diameter and, combined with the fine continent-derived components, produce a fairly typical, pale-coloured open-ocean or pelagic sediment, soft to the touch but gritty between the teeth, and containing abundant water before burial. On the sea floor, as some of the photographs show, the upper few centimetres acquire a brownish hue as a result of oxidation at the sediment-ocean water interface. The light sediment dusting seen on the very youngest lavas reflects a gentle rain of the sea-surface derived particles, dispersed more or less homogeneously within the water mass on their arrival at the sea floor. Once there, however, the sediments do not remain undisturbed. Some are eventually redistributed by gravity, sliding off steep gradients and accumulating on gentle slopes or in the graben or in small hollows and troughs on the slopes themselves. Others are probably shifted by deep tidal currents and by slow, more secular, sea-floor currents, which may combine periodically to reach speeds of several centimetres per second. The resuspension of sediment by benthic creatures, some of whose portraits appear in this book, no doubt facilitates this sort of sediment displacement.

46. Plage de sédiment au pied d'un mur de faille, à 21 km de l'axe de la dorsale. Une ophiure à gauche, deux holothuries et une éponge blanche à droite.

Well away from the axis of the Rise, in the area where the last major reversal of the earth's magnetic field is recorded in the rocks, a sediment-covered « beach » abuts an old fault plane. All faults in this area are inactive. To the left, an ophiuroid ; to the right, two holothurians (*Aspidochirota*) and a white sponge.



47

△

47. **Champ de laves drapées**, nimbées de sédiment ; en haut à gauche la griffe de Cyana.

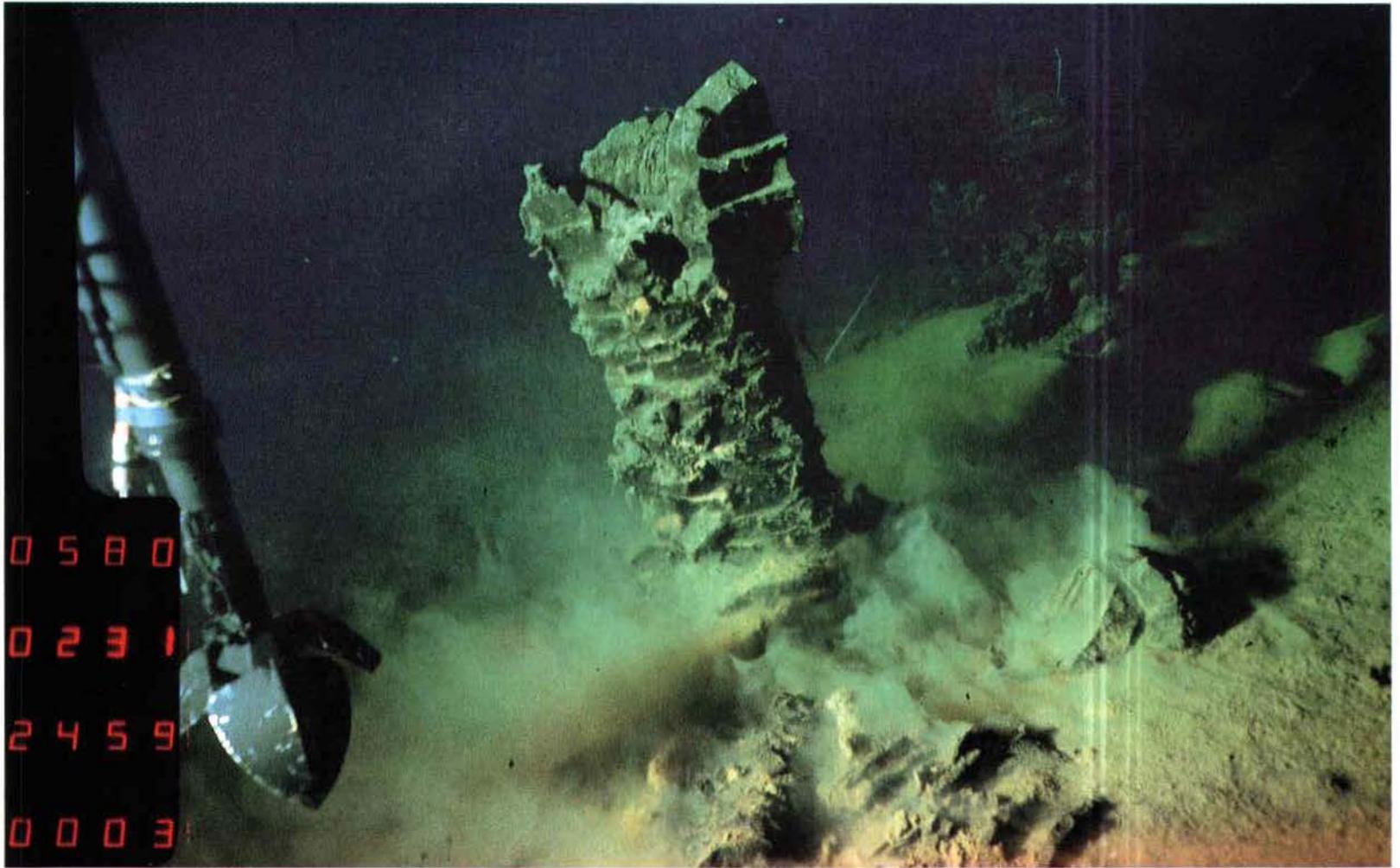
The clawed arm of Cyana looms over wrinkled drapes of fluid lava partially buried under sediment.

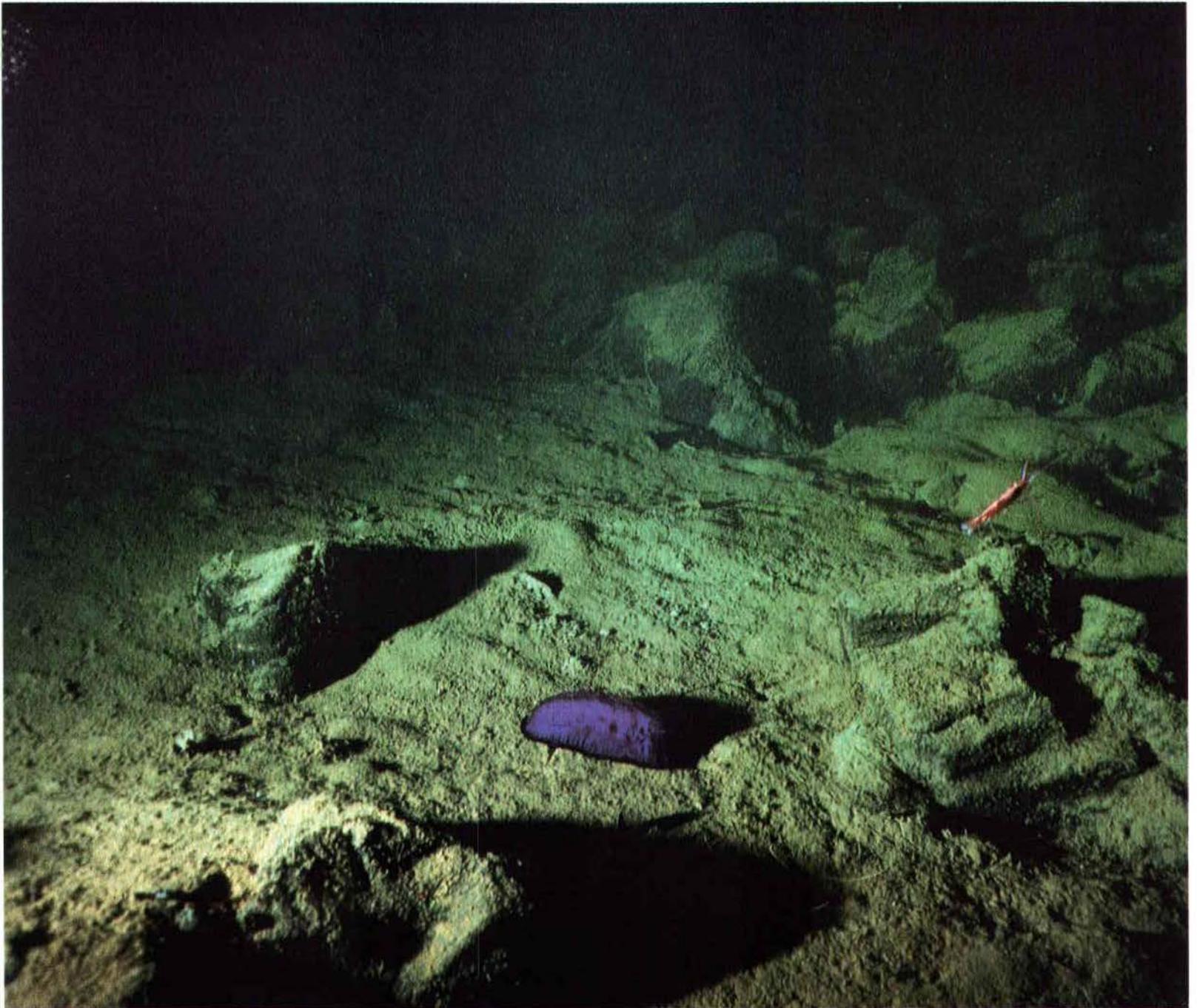
48. A l'approche du fond d'un lac. Cyana soulève un nuage de sédiment. **Le petit pilier** ▶ montre un sommet en corolle ; renversé par le bras, il se révélera creux.

Cyana lifts up a cloud of sediment around a small pillar with a lily-shaped top that was deliberately toppled over by the submersible and seen to be hollow.

49. **Triomphe du sédiment**. Nuage soulevé par Cyana.

The sediment is fine grained and easily stirred up by the arm of Cyana.





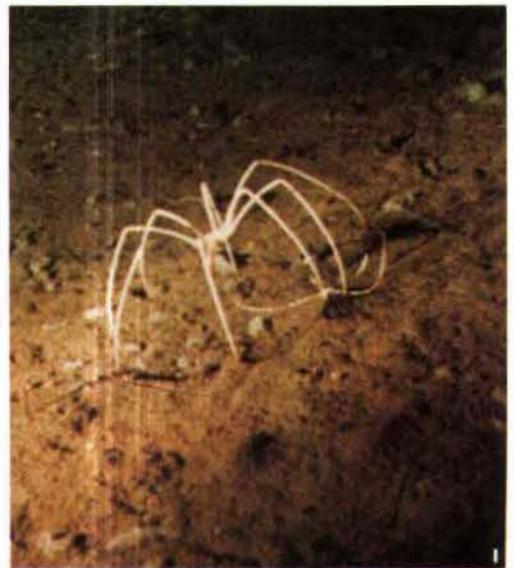
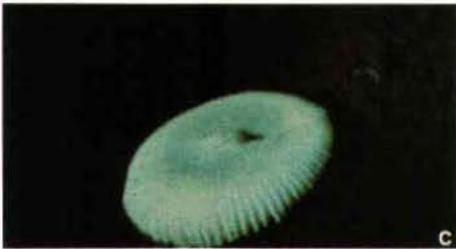
50-51. **Emprise du sédiment.** Il estompe les talus d'éboulis et les affleurements de basalte. En haut, une holothurie violette (peut-être du genre *Benthodytes*) et une crevette rose. Un grand actiniaire rose en bas.

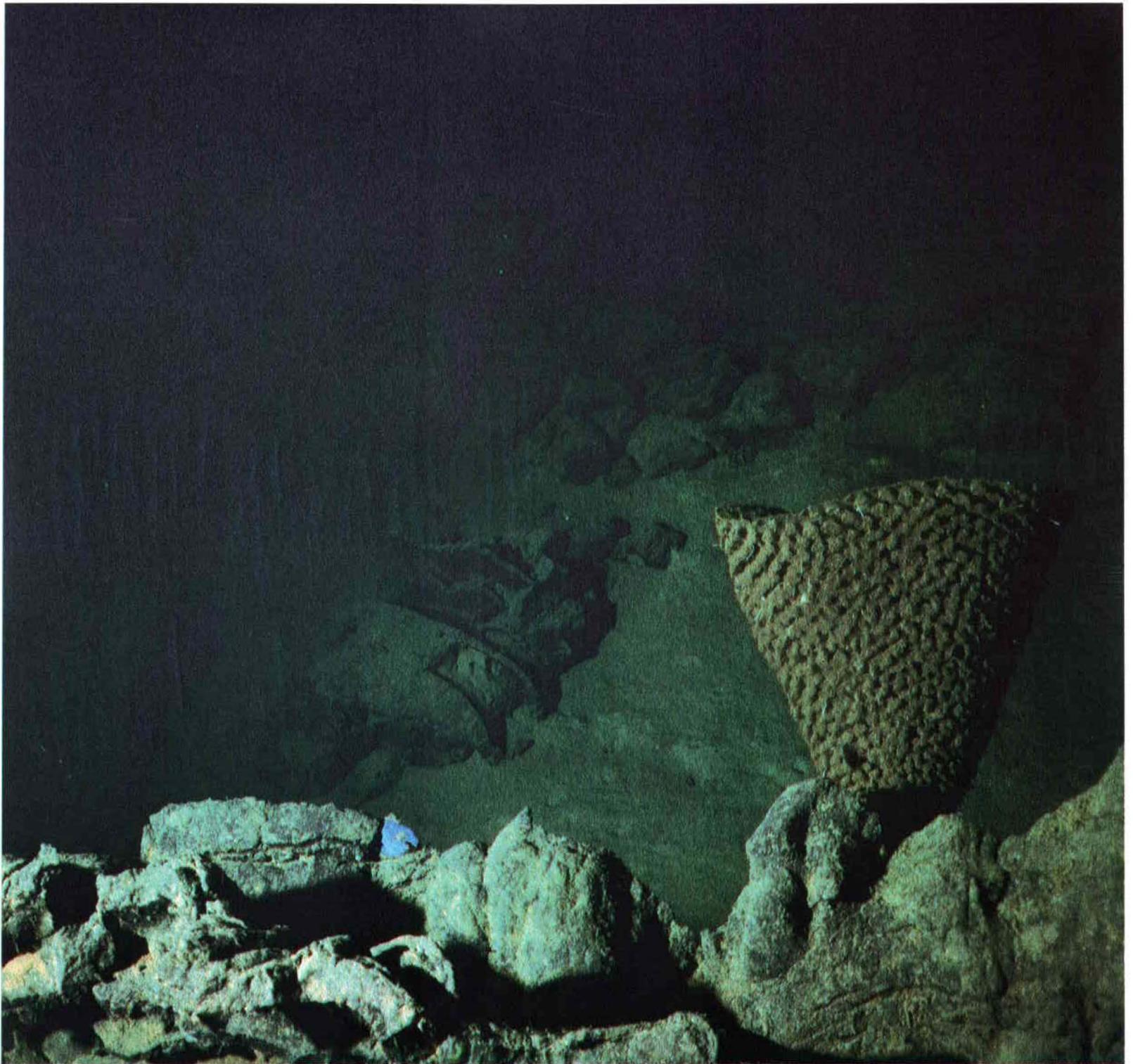
Talus piles and smaller volcanic-outcrops disappear progressively under increasingly thick sediment away from the Rise axis. A swimming shrimp (Decapoda) and, creeping over the sediment, a purple holothurian.

In the second photograph is a large pink actinarian.

52. Les habitants de la dorsale

- a) Anémone de mer (Actinaria)
- b) Non identifié
- c) Madreporaria (fungia)
- d) Octocorallia et Ascidiacea
- e) Actinaria et Ophiuroidea
- f) Actinaria accroché au pédoncule d'un octocoralliaire, les bras s'allongent dans le sens du courant.
- g) Anémone de mer (Actinaria)
- h) Etoile de mer (Asteroidea)
- i) Pycnogonide (Colossendeis)
- j) Poisson abyssal (Macrouridae)
- k) Chidaire (?)
- l) Holothurie abyssale (Deimatidae)





△

53. **Champ de ruines**, vu du sommet d'un grand pilier entouré de fragments de colonnes renversées dans un champ de sédiment. La forme en corbeille à droite est une éponge.

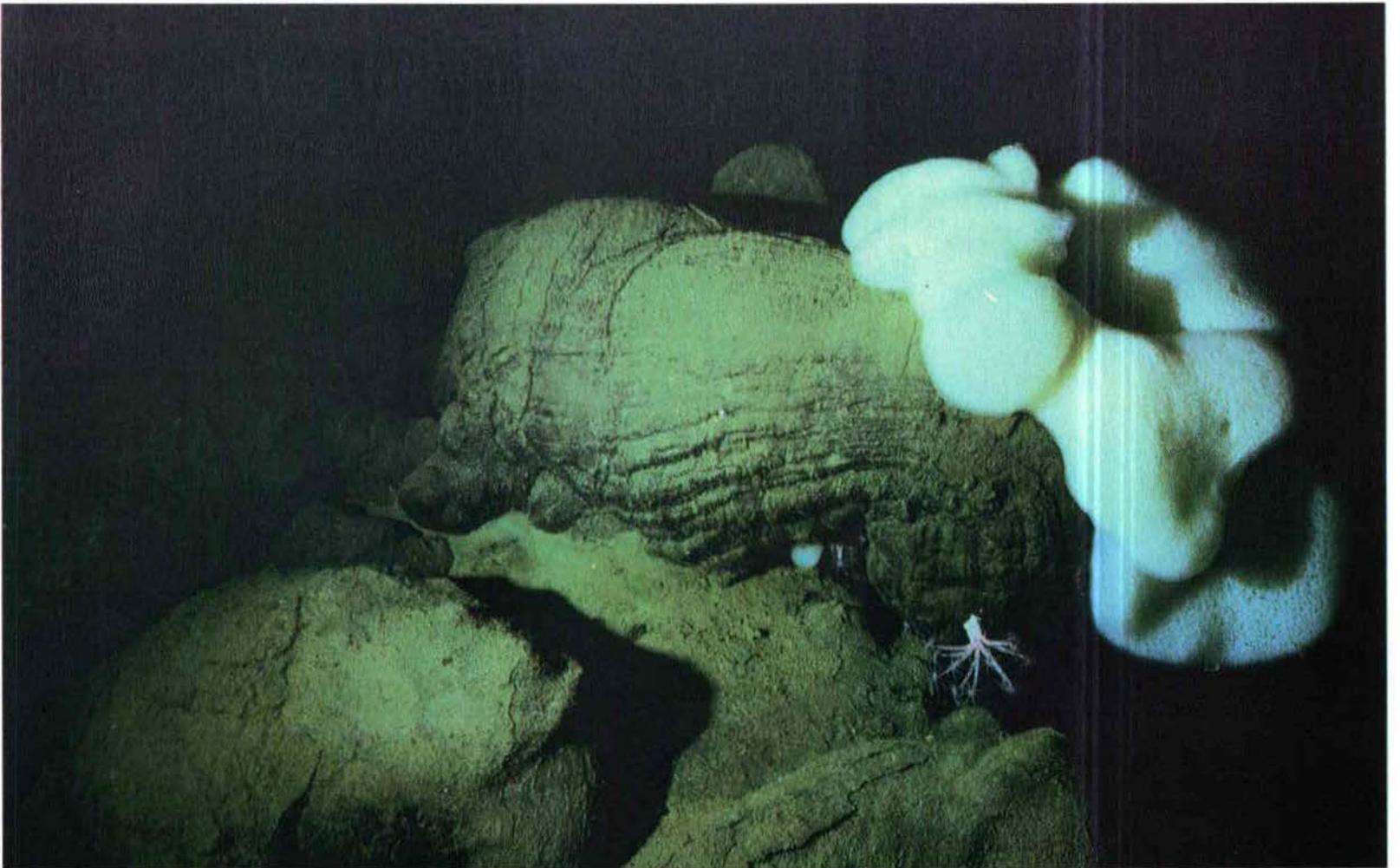
Looking over the edge of a large pillar towards a sediment-covered floor with a scattering of tumbled pillar fragments. On the right is a sponge.

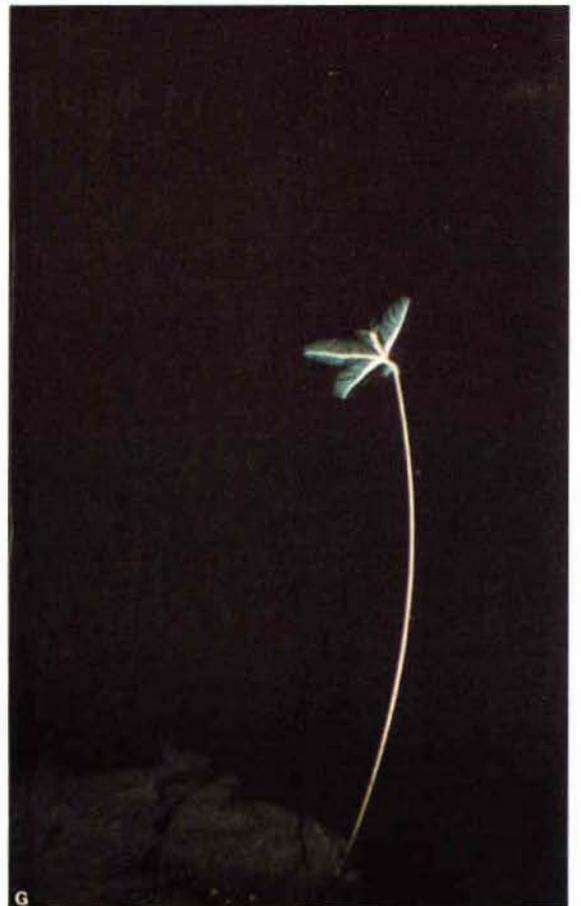
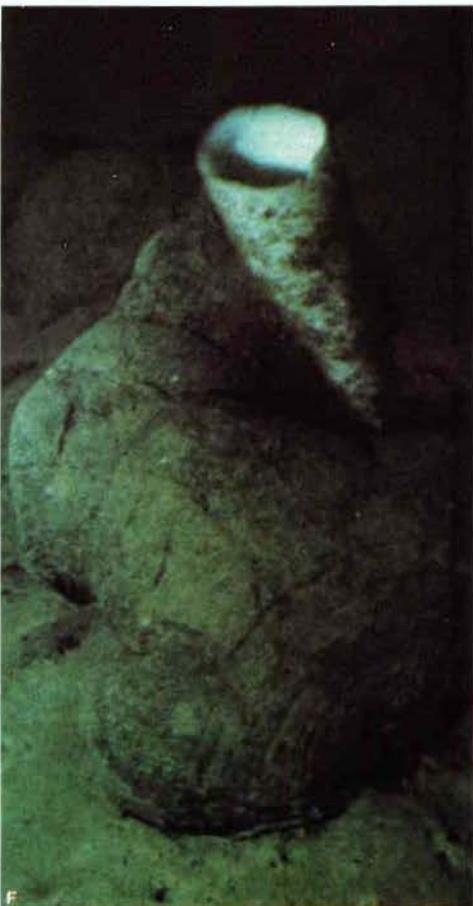
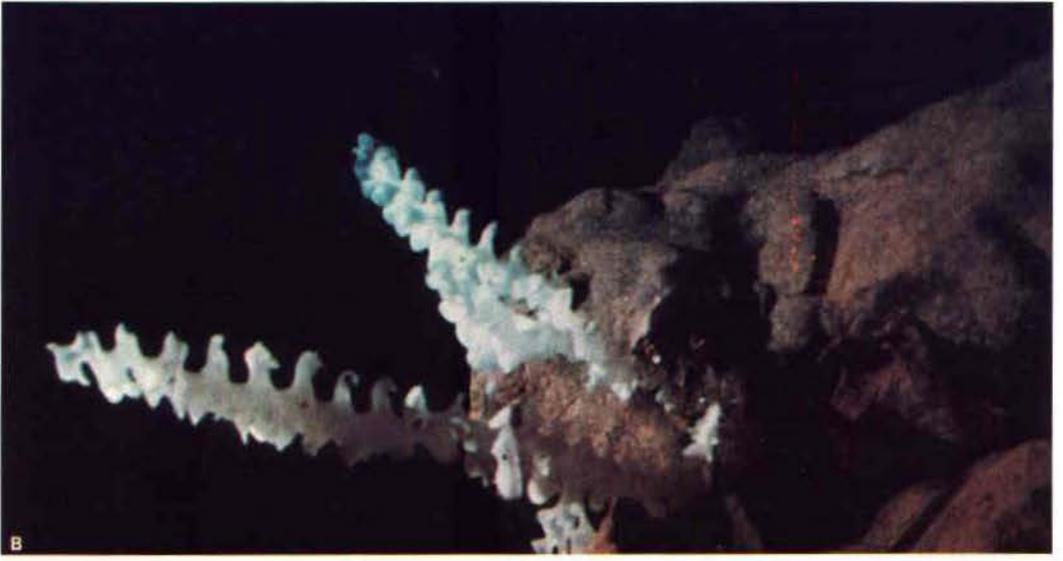
54. **Corolle dentelée d'une espèce rare d'éponge siliceuse** (environ 1 m. de diamètre) elle éclaire un champ de laves lobées.

Lobate lava, bare of sediment, on the edges of the axial volcanic zone. Close-up view of the chalice (1 metre in diameter) of a siliceous sponge.

55. **Grande éponge sur un coussin bulbeux**, dessous, une pennatulaire. Sur le basalte, des stries de croissance.

Striations on the surfaces of bulbous pillows. A flower-shaped siliceous sponge is attached to the rock ; underneath : a sea pen (Pennatulacea).







△

57. Euplectelle, éponge siliceuse, accrochée à des laves vitreuses.

Siliceous sponge (Euplectella) attached to glassy basalt.

57

◁ 56. Les habitants de la dorsale

- a) Anémone de mer (Actinaria). *Sea anemone (Actinaria).*
- b) Cnidaire rare. *Rare cnidarian.*
- c) Comatule (Crinoidea). *Feather-star (Crinoidea).*
- d) Ascidié de grande taille (rare). *Large, uncommon sea squirt (Ascidiacea).*
- e) Etoile de mer à onze bras (Brisingidae). *Asteroid (Brisingidae)*
- f) Eponge euplectelle. *Sponge (Euplectella)*
- g) Crinoïde pédonculé (Hyocrinidae). *Sea-lily (Hyocrinidae)*

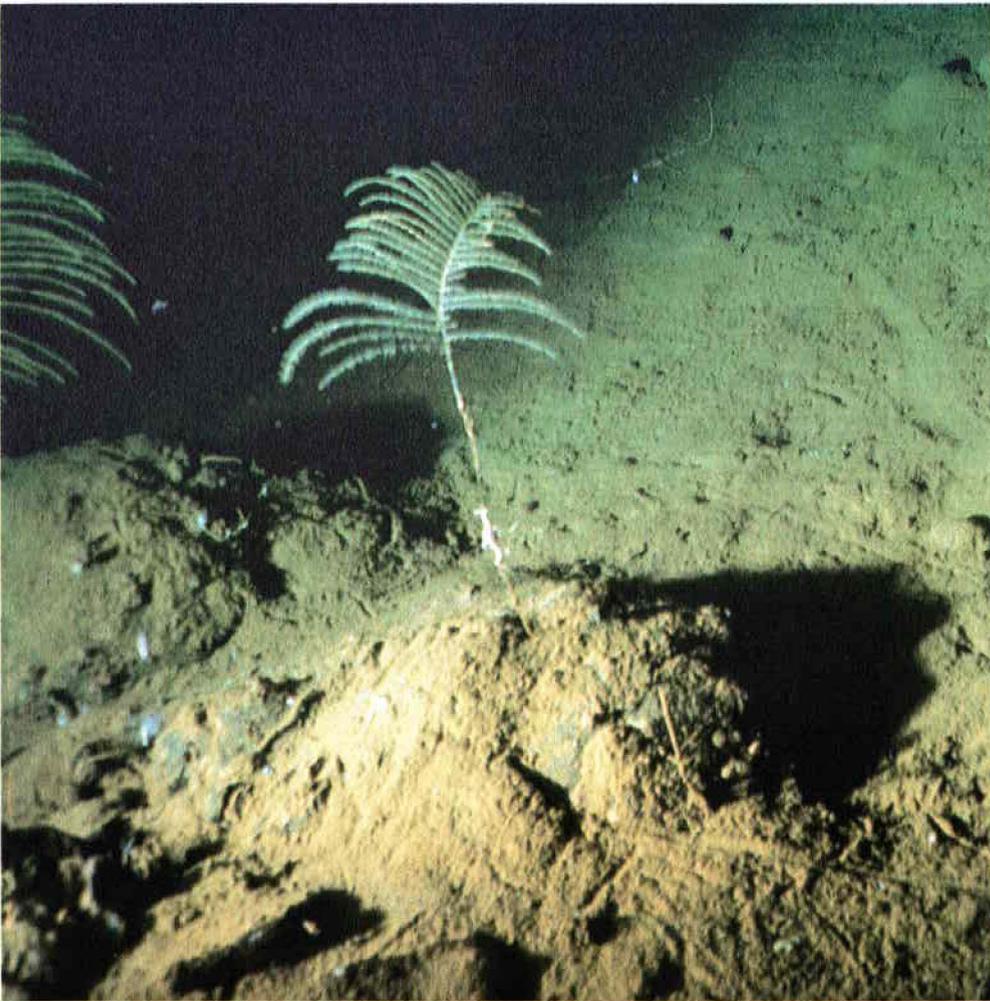
Traces de la vie

58. Pistes et traces d'animaux sur le sédiment. Élégant octocoralliaire en forme de fougère.

Tracks and trails of unseen animals. Sea Pen (Octocorallian coral).

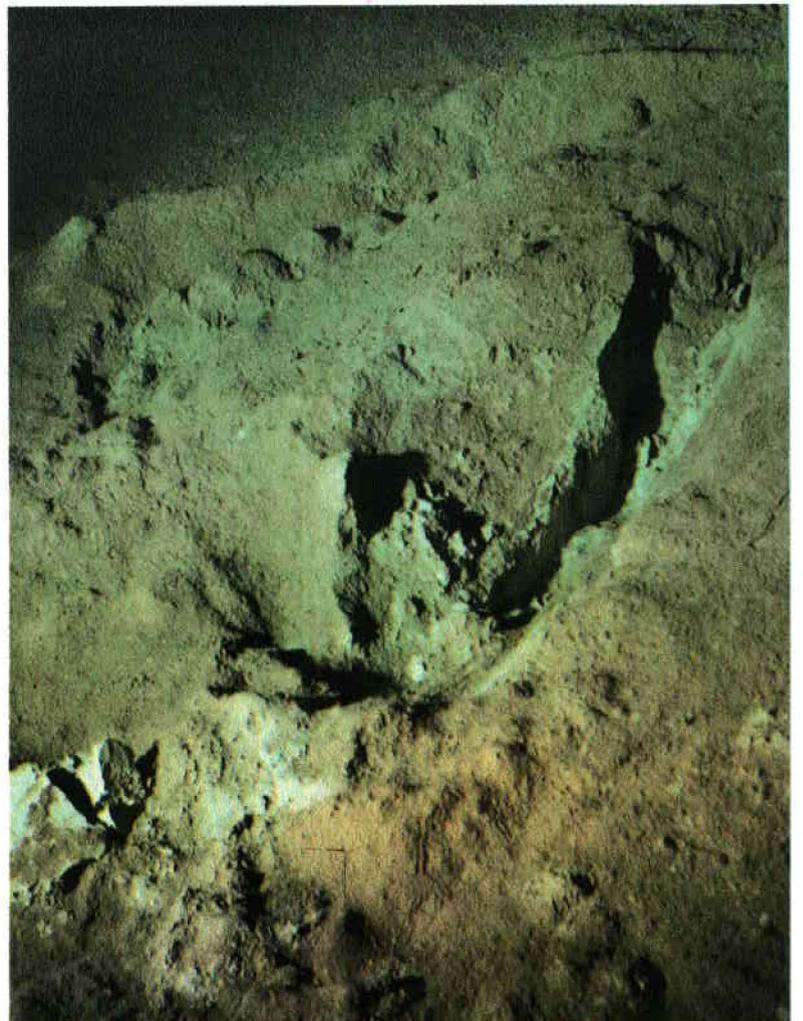
59. Petits cratères construits par les animaux.

The sediment thickens and animals build craters.



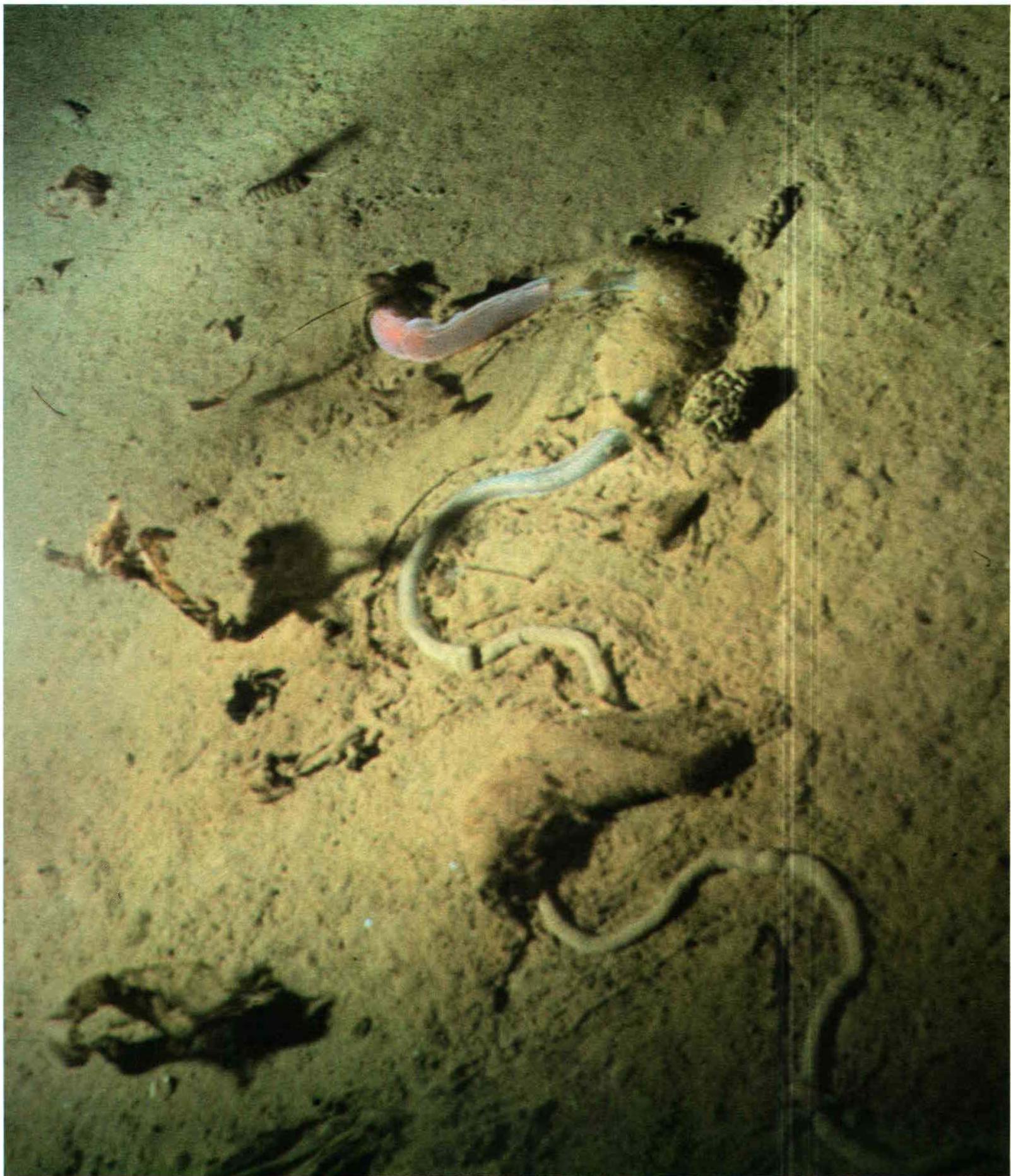
60. Tranchée énigmatique dans le sédiment (1 m de long sur 30 cm de large) la couleur blanche de la boue carbonatée tranche sur le sédiment brun oxydé en surface.

The mysterious scar-like trench in thick calcareous sediment is about one metre long and thirty centimetres wide. Dug by an unknown worker, the furrow unveils the original, pale colour under a brownish oxidized layer.



59

60



61

61. Sillage d'un ver enteropneuste (1 m. de long)

An enteropneust, about one metre long, moves through the soft sediments. Unusual photograph of a worm in the act of disrupting the smooth cover of freshly fallen sediment.

RICHESSES MINÉRALES ET OASIS ANIMALES

METALS AND OASES

La prédiction que des sulfures massifs riches en métaux seraient un jour découverts sur les dorsales est maintenant réalisée. Ces sulfures, introduits dans l'eau de mer à haute température et pression, précipitent rapidement et construisent des édifices poreux et polychromes. Tant que les sources chaudes jaillissent, la vie s'y concentre.

Sulphides, rich in metals, carried in heated-up ocean water circulating along deep cracks below the crest of the East Pacific Rise, are injected through the sea floor at high temperatures, precipitate rapidly and build small variegated mounds. While the hydrothermal springs live, unusual worm-like creatures and giant clams gather round the oases.





63. **Echantillonnage des encroûtements et des blocs de sulfures**, sur la pente d'un fossé tectonique. Le sédiment résulte en grande partie de l'altération des dépôts de sulfure. Le bras de Cyana est équipé d'une sonde de température.

Cyana samples basaltic rubble with encrustations of sulphides and clinker-like sulphide blocks. Much of the sediment is produced by degradation of the sulphides. The arm of the submersible is equipped with a temperature-probe.

◁ 62. **Première photographie de dépôts de sulfures polymétalliques sur les grands fonds** : 2 670 m, le 27 février 1978, plongée Cy. 78-06.

The first photograph of deep-sea metalliferous sulphide deposits. Depth 2670 metres, dive Cy. 78-06, 27th February 1978.



65

65. **Colorations hydrothermales** à la base de laves lobées. elles indiquent que les solutions chaudes ont percolé dans la croûte océanique.

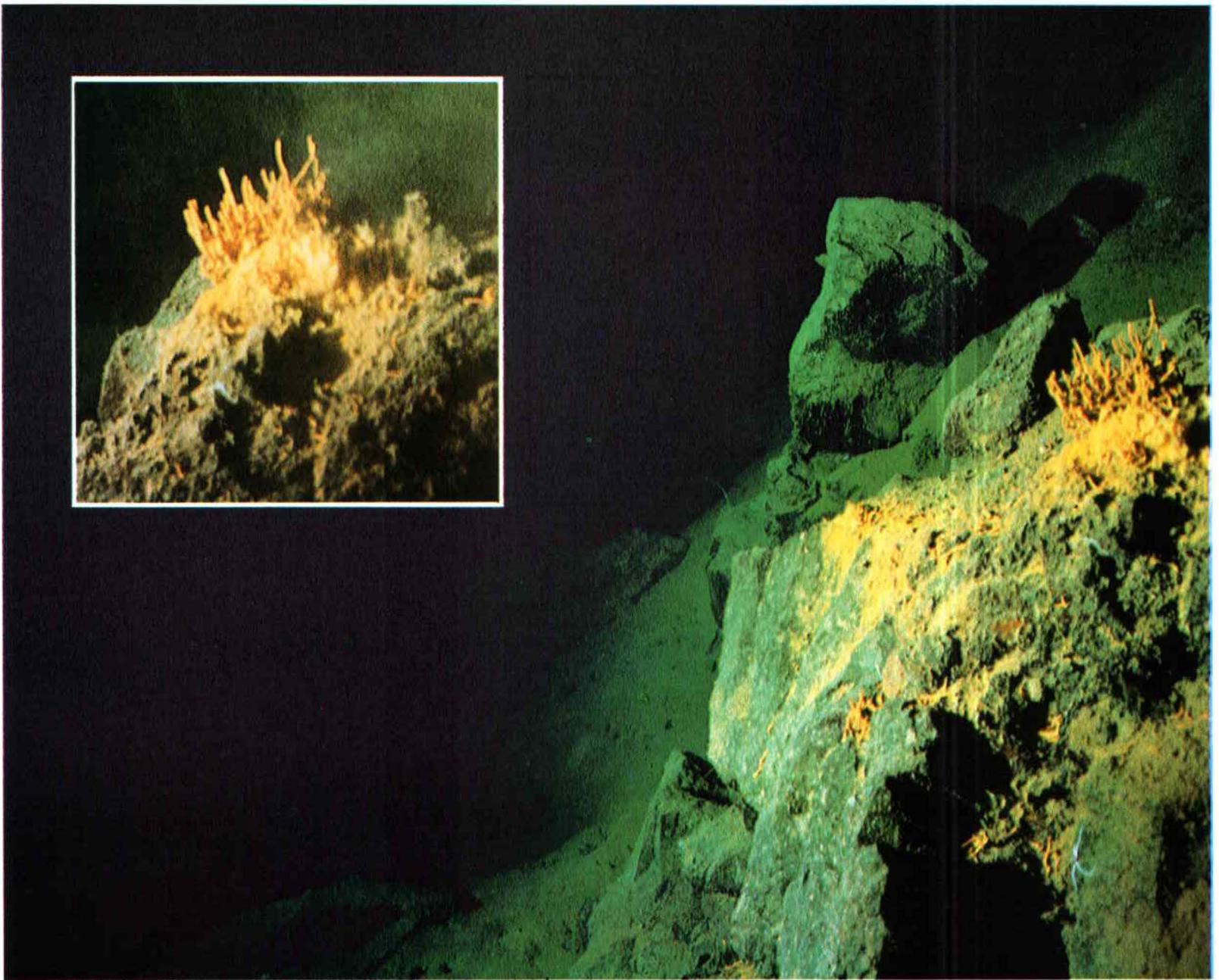
Staining on lobate lava flows indicates that hot hydrothermal solutions percolate through the new crust.

nickel, le plomb, le cobalt et le zinc. Ces solutions hydrothermales, saturées de métaux, vont décharger ces éléments sur ou à proximité du plancher océanique, au moment où la température de ces fluides et leur capacité de garder les éléments métalliques en solution décroissent brutalement. En dehors de cette explication, tout-à-fait vraisemblable, qui fait intervenir des processus physico-chimiques encore mal connus, d'autres modèles plus spéculatifs ont été proposés. Les sulfures proviendraient par exemple d'une phase liquide immiscible formée au sein même des réservoirs magmatiques profonds. Les deux modèles doivent maintenant être testés sur le plan théorique et expérimental, dès que nous connaissons la chimie complète des sulfures.

Comme le montrent plusieurs photographies, beaucoup de laves récentes à la crête de la dorsale présentent des dépôts colorés. Ceux-ci démontrent que l'activité hydrothermale n'est pas restreinte aux seuls sites comportant des édifices polymétalliques, mais qu'elle est un phénomène beaucoup plus général. En fait, la vaste répartition des basaltes colorés en rouge, orangé ou jaune par des dépôts hydrothermaux est un des caractères les plus frappants de la zone Cyamex. Ces colorations sont en revanche totalement inexistantes sur la zone de l'expédition Famous, où seuls quelques dépôts très localisés ont été observés dans une faille transformante. Les dépôts sulfurés représentent une activité concentrée, alors que les colorations plus largement disséminées correspondent à des percolations diffuses d'eau chaude à travers la croûte océanique.

elements by precipitation at or near the surface of the sea floor, where the temperature of these fluids and their capacity to keep the metallic elements in solution are rapidly and drastically reduced. Although this seems to be a respectable explanation, the physical chemistry of the process is not yet clear and there have been other suggestions ; it has been proposed, for example, that some segregation of sulphides from the basaltic magma itself might take place. In any event, when the full chemistry of the deposits is known, various models will be amenable to theoretical and experimental tests.

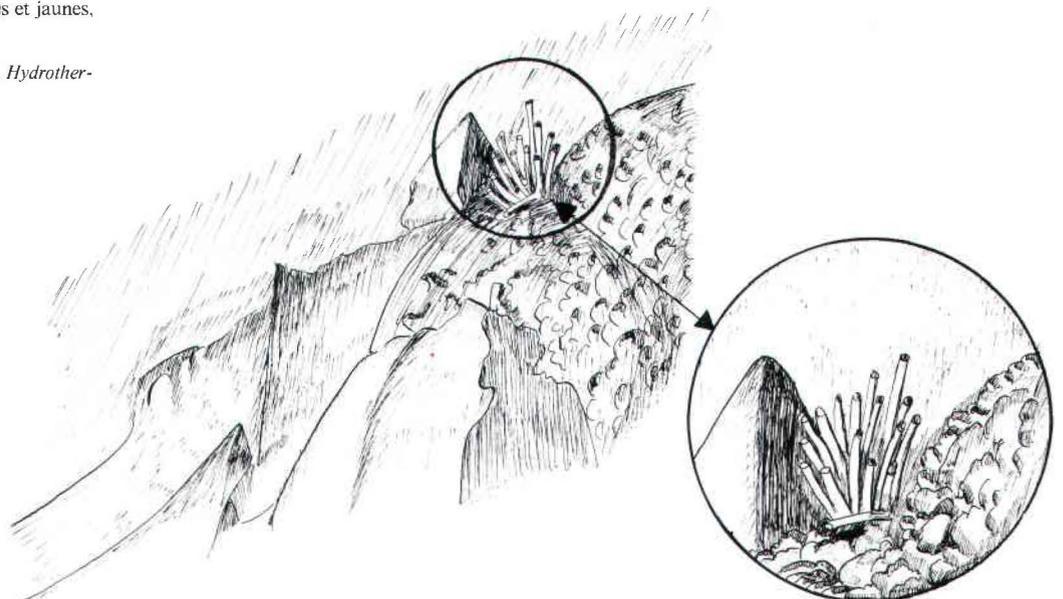
As illustrated in several photographs in this book, coloured deposits stain many of the young rocks on the crest of the East Pacific Rise at 21 degrees North. The deposits are clear evidence that hydrothermal activity here is not restricted to the discrete sites of the sulphide mounds but is a more general phenomenon. Indeed, the widespread distribution of basalts stained with red, orange and yellow deposits, or all three, is one of the most striking features of the Cyamex area. In contrast, there is a dearth of such deposits on the part of the Mid-Atlantic Ridge visited during the Famous Expedition, where only one local occurrence of hydrothermal staining was seen, and that was observed in a transform fault. The implication of the two different modes of occurrence of the hydrothermal deposits in the Cyamex area is that the sulphide mounds represent concentrated activity, and that the more disseminated stainings are the result of relatively gentle upward percolations of hot water.



66

66. **Site hydrothermal** à 1 km à l'ouest de la zone des laves jeunes sur le flanc d'une grande faille normale. Des cristaux de soufre, oranges et jaunes, ont recouvert une touffe de corail.

Bright yellow-orange sulphur crystals decorate a deep-sea coral. Hydrothermal site, 1 kilometre to the west of the axis of the Rise.



75

Cimetière de coquillages

Au cours de l'avant-dernière plongée dans la partie sud de la zone axiale, nous avons aussi découvert une colonie de bivalves fossiles géants, appartenant à une espèce de la famille des Vésicomydés, déjà observée par le submersible Alvin, sous forme de colonies vivantes jalonnant des sources d'eau chaude à l'axe du Rift des Galapagos. Ces coquilles s'agglutinent le long d'une bande étroite parallèle à l'axe de la dorsale, sans doute autour de sources aujourd'hui tarries. Certains pillows sont couverts de tubes de vers serpulides morts et montrent un poli noir et mat, comme s'ils avaient été recouverts par une couche de suie. A l'époque, nous pensions que ce matériel était de l'oxyde de manganèse d'origine hydrothermale. Mais aucun dépôt analogue n'a été observé même sur la croûte océanique légèrement plus ancienne, ce qui suggère qu'il est soluble dans l'eau de mer, propriété peu vraisemblable pour le manganèse. Les coquilles ont toutes à peu près la même taille, soit une vingtaine de centimètres de long. Elles sont déjà partiellement dissoutes, mais se présentent encore dans leur position de vie. Les clams ont dû mourir lors du tarissement de la source chaude ; mais quand cela est-il arrivé ?... Comment ces animaux localisent-ils de nouvelles sources actives ? Leur métabolisme diffère-t-il de celui de leurs « cousins » vivant près des côtes et dans des eaux plus froides ?...

Une première réponse : le taux de croissance d'un bivalve géant fossile, trouvé par l'Alvin sur le rift des Galapagos, a été déterminé à l'Université de Yale, en mesurant les quantités de radio-nucléides naturels dans les différentes couches de la coquille. On a estimé que son âge était de six ans et demi au moment du prélèvement, ce qui implique un taux de croissance au moins cinq cent fois plus rapide que celui des bivalves trouvés sur les fonds de l'Atlantique. La meilleure explication de cette différence est que la quantité de nourriture

Giant clams

In the southern part of the axial area of the East Pacific Rise explored during Cyamex, and with only one dive left, a colony of dead giant clams was found. The clams belong to the same family of bivalves (Vesicomysidae) first seen the previous year in thriving communities from the submersible Alvin at the axis of the Galapagos Rise. The dead clams in the Cyamex area lie in a narrow corridor surrounded by pillows, some tens of metres from the axis of the Rise and parallel with its trend. Some of the pillows are covered with the stems of dead serpulid worms and have a black, matt finish, suggesting a cover of soot. It was thought at the time that the sooty material was hydrothermal manganese oxide. However, no similar deposits were found on even slightly older ocean floor, indicating that the deposits were soluble in ordinary sea water, an unlikely property of the presumed compound.

The clam shells seen from Cyana were all about the same size, up to perhaps twenty centimetres across. They were already partially dissolved but some were still poised in the postures of the living. The clams must have died when a hot spring ceased ; but how long ago this happened and how the clams locate newly active springs in the first place is not clear, nor is it known whether their metabolism differs from that of their more pedestrian equivalents living in cold waters. A start has already been made towards determining how fast the giant clams may grow. The shell that has been examined was one of those found by Alvin next to a hot spring on the Galapagos Rise ; the age of the shell, determined by measuring the amount of certain natural radionuclides that it contained, was found to be six and a half years, which implies a growth rate about five hundred times faster than that assessed for an ordinary deep-sea clam from the





68

67-68. **Cimetières de bivalves géants.** Ils jalonnent les fissures des laves en coussin à l'axe de la dorsale et sont les reliques d'une ancienne source chaude. Quand sont-ils morts ?... Les coquilles (15 à 20 cm) sont très friables, en partie dissoutes dans l'eau froide des grandes profondeurs, sous-saturée en carbonate de calcium. Cyana remontera bredouille. Des tubes de vers polychètes sont encore attachés aux surfaces de laves noirâtres et comme recouvertes de suie.

Site of the giant clam shells, the largest of which are 15-20 centimetres long. The shells, marking the spot of a recently active hot spring, are scattered on sediment-bare pillow-lavas close to the axis of the Rise. The clams belong to the unusual family Vesicomysidae. Tubes of dead worms (Polychaeta) are still attached to the soot-covered pillow surfaces.

disponible, des bactéries, joue beaucoup plus que la température : un cas de boulimie sous-marine en quelque sorte !

Sources chaudes, oasis de vie

Au cours de l'expédition Rise, l'histoire a été complétée d'une manière spectaculaire par la découverte de sources d'eau chaude associées à des amas sulfurés coniques et à de denses et étranges communautés biologiques. Les sources ont été localisées grâce à l'engin remorqué Angus, qui prend des photographies et mesure les températures de l'eau au ras du plancher océanique. Elles ont été ensuite visitées et échantillonnées par les scientifiques, à bord de l'Alvin.

Lors de la première plongée sur une source active, Alvin est arrivé au milieu d'une véritable oasis de vie, agglutinée autour de quelques hautes cheminées couvertes de vers tubicoles (*Vestimentifera*). L'eau chaude moirée et laiteuse qui s'élève au dessus de la source a été échantillonnée et analysée. Quoique diluée par de l'eau de mer, elle contient jusqu'à un million de cellules bactériennes par millimètre cube, ce qui est considérablement supérieur aux teneurs de l'eau de mer. Ces bactéries pourraient fournir l'essentiel des éléments nutritifs nécessaires à la communauté biologique, en décomposant le sulfure d'oxygène en soufre et sulfates, par oxydation.

Les dépôts colorés recouvrent à la fois les cheminées des oasis et les laves voisines. Les échantillons prélevés se sont révélés de même nature que les sulfures polymétalliques un peu plus anciens découverts par Cyana. Une telle association de sulfures et de faune ouvre un champ de recherches fascinant pour les biochimistes.

Mais c'est au cours des plongées suivantes que le spectacle le plus extraordinaire devait être offert aux occupants du submersible, qui cherchaient une des cibles localisées par Angus : crachant comme des locomotives, plusieurs cheminées, au faite d'édifices polychromes sulfurés, projetaient à plusieurs mètres de hauteur des volutes tourbillonnantes d'eaux chaudes, noirâtres ou blanchâtres selon les lieux. Le submersible s'approcha du site de l'éruption et essaya sans succès de mesurer la température du geyser d'eau chaude, juste à la sortie d'une cheminée : la température monta immédiatement hors de l'échelle de la sonde thermique utilisée (> 32 °C), et un tube plastique (PVC) immergé dans la colonne d'eau chaude se mit à fondre, indiquant une température de l'ordre de 400°C. Jamais on n'avait mesuré de telles températures sur les fonds océaniques et il s'en faut de beaucoup : les plus hautes températures connues se chiffraient en dizaines de degrés ! Quand l'Alvin a visité à nouveau cette zone en novembre 1979, une sonde thermique spécialement construite a enregistré une température de 350°C dans une de ces colonnes d'eau chaude. L'étude de ces eaux a montré qu'elles sont chargées de particules de sulfures. Les échantillons du dépôt noir et mat, avec une surface polie, qui couvre les pillows voisins, sont formés de sulfures et non de manganèse, comme nous l'avions d'abord pensé. Ceci explique pourquoi ces dépôts ne se trouvent qu'à l'axe de la dorsale et près des sources chaudes : là les sulfures sont encore trop récents pour avoir été altérés et dissous. Par ailleurs l'association des sulfures avec des animaux vivant dans des tubes (*vestimentifères* et *polychètes*) expliquerait les labyrinthes tubulaires des échantillons de Cyamex, ainsi que les conduits contournés formant la masse des édifices sulfurés. Les communautés vivantes hydrothermales représentent la première association biologique réellement nouvelle découverte sur les fonds océaniques depuis l'expédition du Challenger il y a un siècle. Ces étonnantes communautés pourraient bien modifier nos estimations des conditions extrêmes supportables pour la vie, ainsi que nos idées sur les phénomènes d'évolution dans de telles conditions.

Atlantic. The Brobdingnagian size of the Pacific shell may be primarily the result of deep-sea bulimia provoked by an unusually abundant supply of food. It is not known whether temperature plays any role.

Hot springs

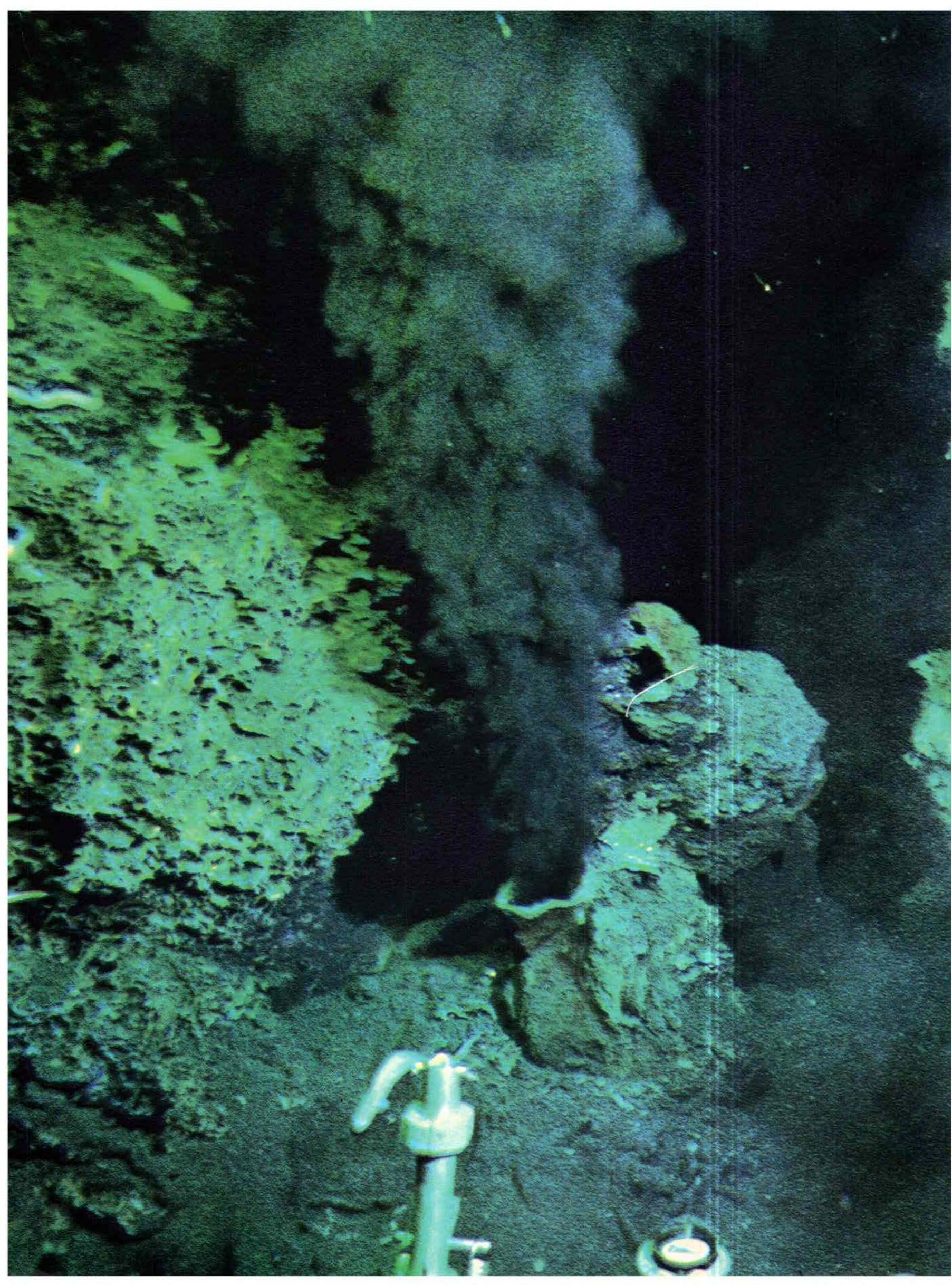
During the Rise Expedition, the story begun during Cyamex a year earlier was completed in a spectacular way with the discovery of hot-water vents associated with conical sulphide mounds and with dense communities of living fauna. The vents were detected by the unmanned instrument Angus, which takes photographs and measures water temperatures while being towed near the sea floor, and they were then visited and sampled by scientists in the submersible Alvin.

On the first dive to one of the active vents, Alvin landed in an oasis with a rich biological population and, in the middle of the oasis, found tall, erect columns supporting long tube-worms belonging to the Order Vestimentifera. The shimmering, milky water above the vent was sampled and, although already diluted with ordinary sea water, was found to contain up to a million bacterial cells per cubic millimetre, a much higher concentration than is found in ordinary sea water. By oxidizing hydrogen sulphide to elementary sulphur and to sulphate, the bacteria may provide most of the food needed to sustain the faunal community. Coloured deposits covered both the columns in the oasis and the neighbouring pillow lavas, and samples of some of the deposits have been shown to be essentially the same as those of the somewhat older sulphide ores discovered with Cyana. The association of the sulphides and the weird fauna clearly opens an interesting avenue for biochemical work.

On a subsequent dive of Alvin, the occupants of the submersible, guided to a target pin-pointed by Angus, were presented with the extraordinary sight of a hot-water vent in full blown activity. A black 'smoke', in fact warm, sooty water, was seen spewing out forcefully from the top of a sulphide edifice, as if out of the funnel of an old engine. The submersible approached the site of the eruption and attempted without success to measure the temperature of the jet of water on its exit from the funnel. The temperature reading went off the scale, calibrated to read a maximum of thirty-two degrees Celsius ; a PVC rod used as the support for the thermistor was charred and melted in the jet, indicating a water temperature of about four hundred degrees Celsius, an order of magnitude hotter than anything measured before in the deep sea. In November 1979, when Alvin revisited the area, a specially designed heat-probe registered a temperature of three hundred and fifty degrees Celsius when inserted into the same jet. A study of samples of the jet of hot water has shown that it is laden with sulphide particles. Samples of the black deposit with a matt surface covering neighbouring pillows turn out to be made up of sulphides and not manganese as we originally thought. This explains why these deposits are peculiar to the axis of the Rise near the vents ; the sulphides here are still too young to have been altered and dissolved. Furthermore, the

69. **Cheminée active** (20 avril 1979). Le submersible Alvin, guidé par le travail de reconnaissance photographique et thermique de l'engin Angus, a découvert le spectacle hallucinant de cette cheminée (1 m de haut) qui émet un jet puissant d'eau noire chargé de particules de sulfures à une température de 350 °C. Les animaux sont plus rares dans ce site mortel.

Production of the sulphide deposits were witnessed for the first time during the Rise expedition. An active chimney, about 1 metre high, spews forth a jet of black water, laden with sulphide particles. Life is scarce close to this deadly environment. Photograph from Alvin, April 20 th 1979.

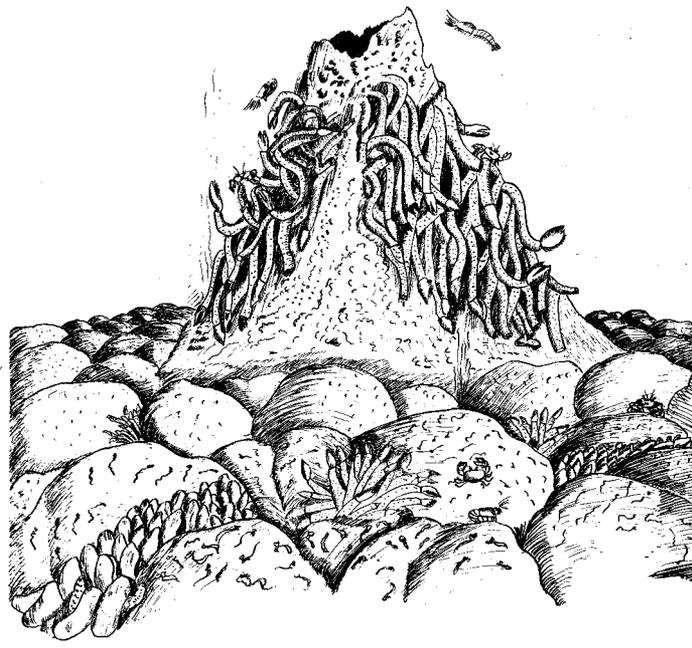


Il n'y a pas de raison particulière pour supposer que les dépôts sulfurés se soient formés dans des conditions spéciales dans la zone Rita sur la dorsale du Pacifique. L'observation directe des processus qui créent des sulfures sur la croûte océanique devrait donc stimuler les recherches sur les zones d'accrétion lithosphérique et permettre de développer de nouvelles idées sur les concentrations possibles de métaux dans les couches supérieures de la croûte océanique. Parmi les zones prioritaires pour de nouvelles observations détaillées, on peut citer les bassins marginaux situés à l'arrière des arcs insulaires du Pacifique occidental. On peut citer aussi la dorsale du Pacifique occidental à 15 degrés sud, où des concentrations élevées d'hélium dissous d'origine mantélique ont été mises en évidence dans l'eau de mer au dessus de la dorsale. La présence de ce gaz indique l'existence de voies d'accès à des niveaux profonds sous le plancher océanique, et démontre par ailleurs que le dégazage de notre planète est loin d'être terminé.



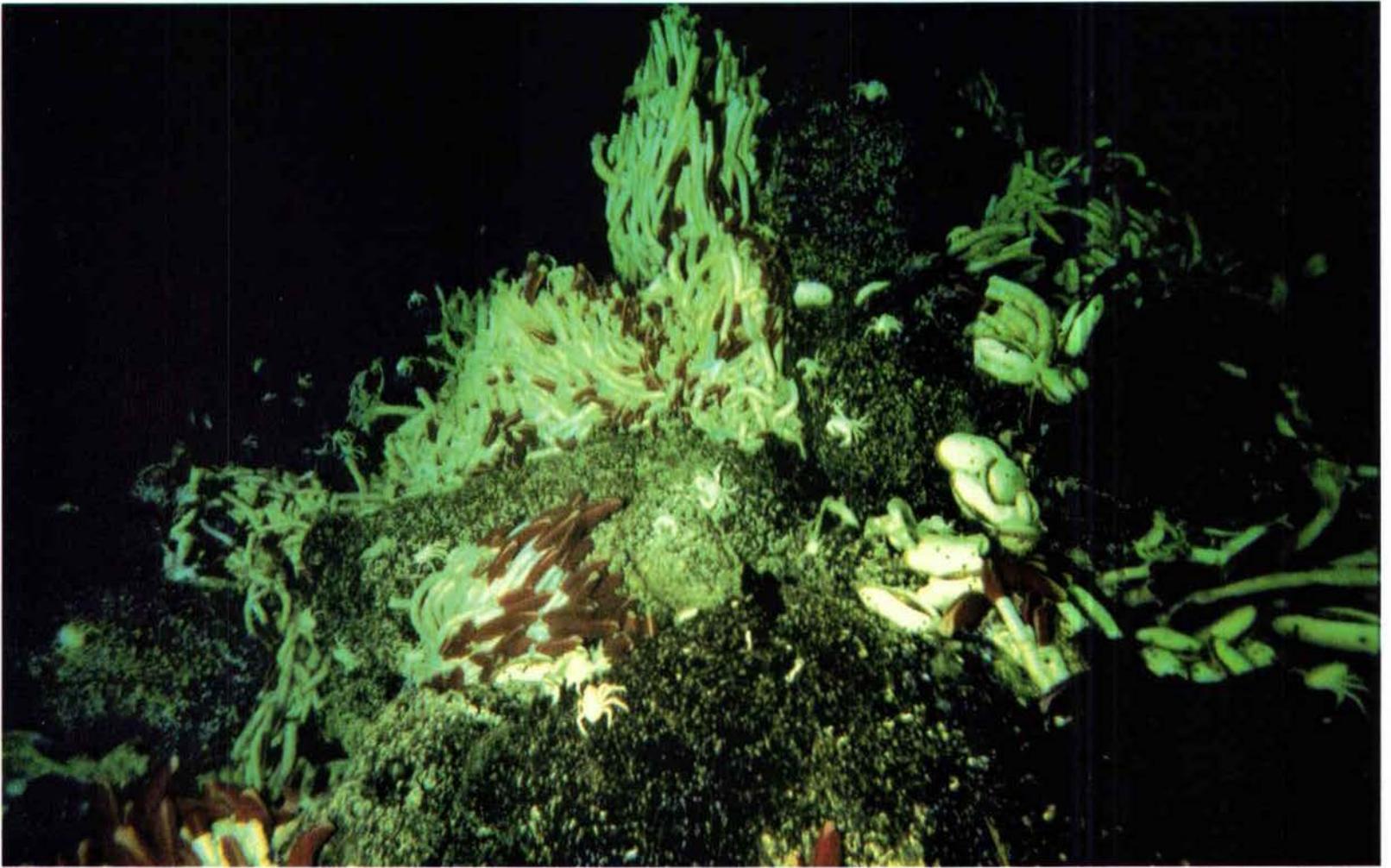
association of sulphides with animals sheathed in tubes (Pogonophora and Polychaeta) seems to explain the origin of the tubular labyrinths seen in the Cyana samples, and of at least some of the contorted conduits making up the mass of the sulphide edifices.

The discovery of hydrothermal benthic communities may be the most outstanding find of deep-sea fauna since the heyday of deep-ocean Marine Biology a hundred years ago, and may possibly lead to an extension of some ideas about adaptation of deep-sea life to abnormal environmental stress. For the earth scientist, there is no sound reason yet to suspect that the ore-grade sulphide deposits are peculiar to the 21 degrees North area of the East Pacific Rise. The observation of the processes that create the sulphides at work on the sea floor should thus provide a stimulus to continue studies of accreting plate-boundaries and to make new assessments of possible concentrations of metals in the upper layers of the oceanic crust. Among attractive places for closer examination are some of the marginal basins lying behind island arcs of the western Pacific. Other places include sites on the East Pacific Rise near 15 degrees South, where high concentrations of dissolved helium of mantle origin are present in the water column above the Rise. The presence of this gas indicates the existence of paths of access to deep levels beneath the sea floor and holds the additional interest of being evidence that the degassing of the primaeval earth is not yet complete.



70-71. Champs de vers tubicoles pogonophores (*Vestimentifera*) autour de cheminées de sulfures désormais inactives.

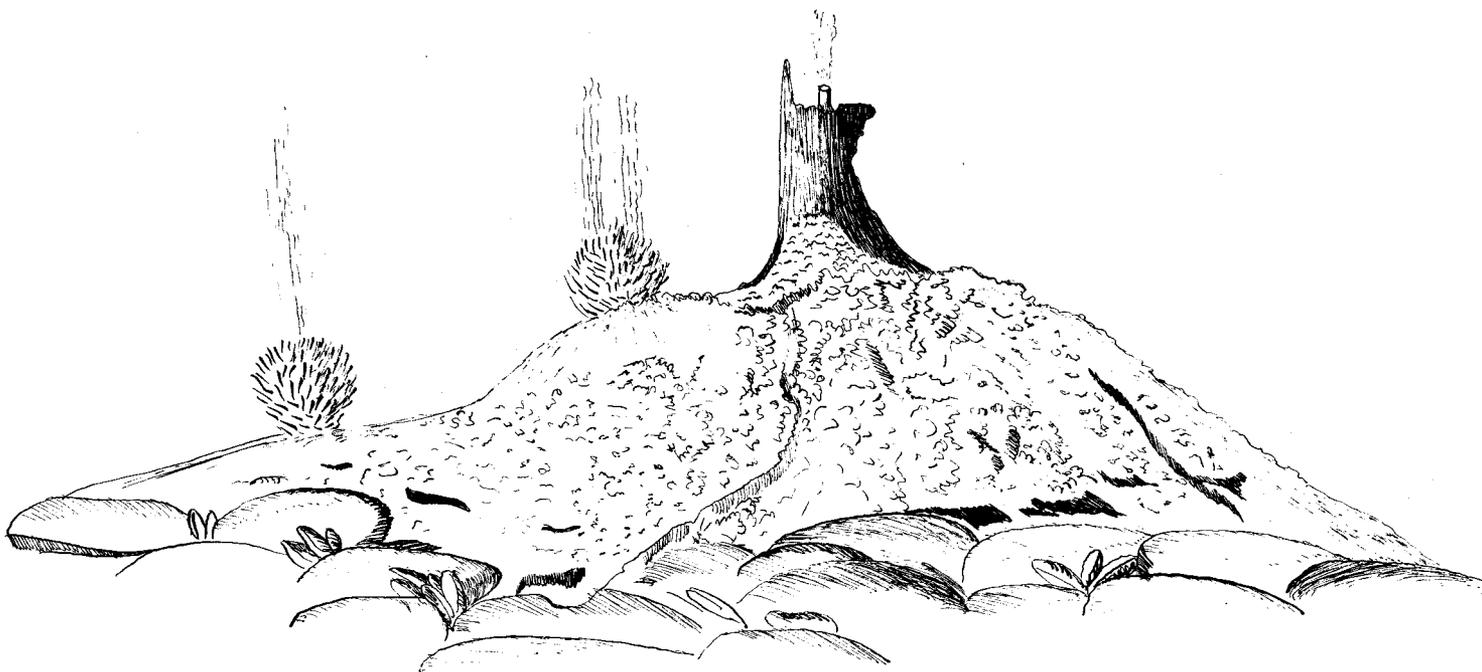
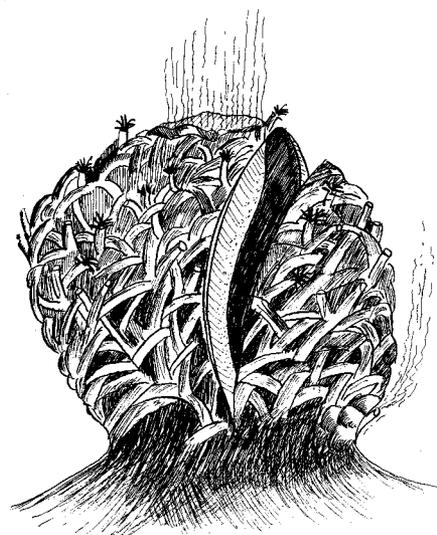
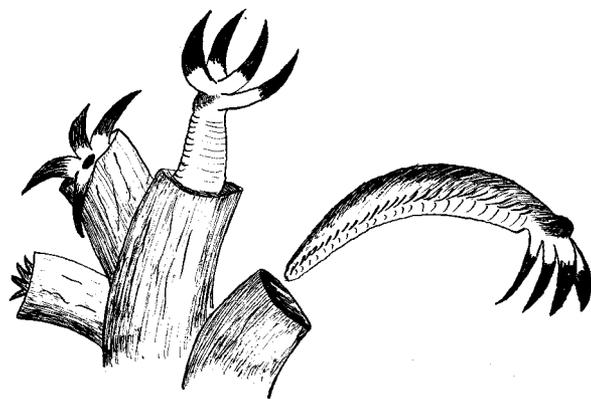
*Dense fields of red-tipped tube-worms (*Pogonophora*, *Vestimentifera*) are found on or close to inactive sulphide chimneys. Several crabs (*Galathea*), and several bivalves (*Vesicomyidae*).*



70

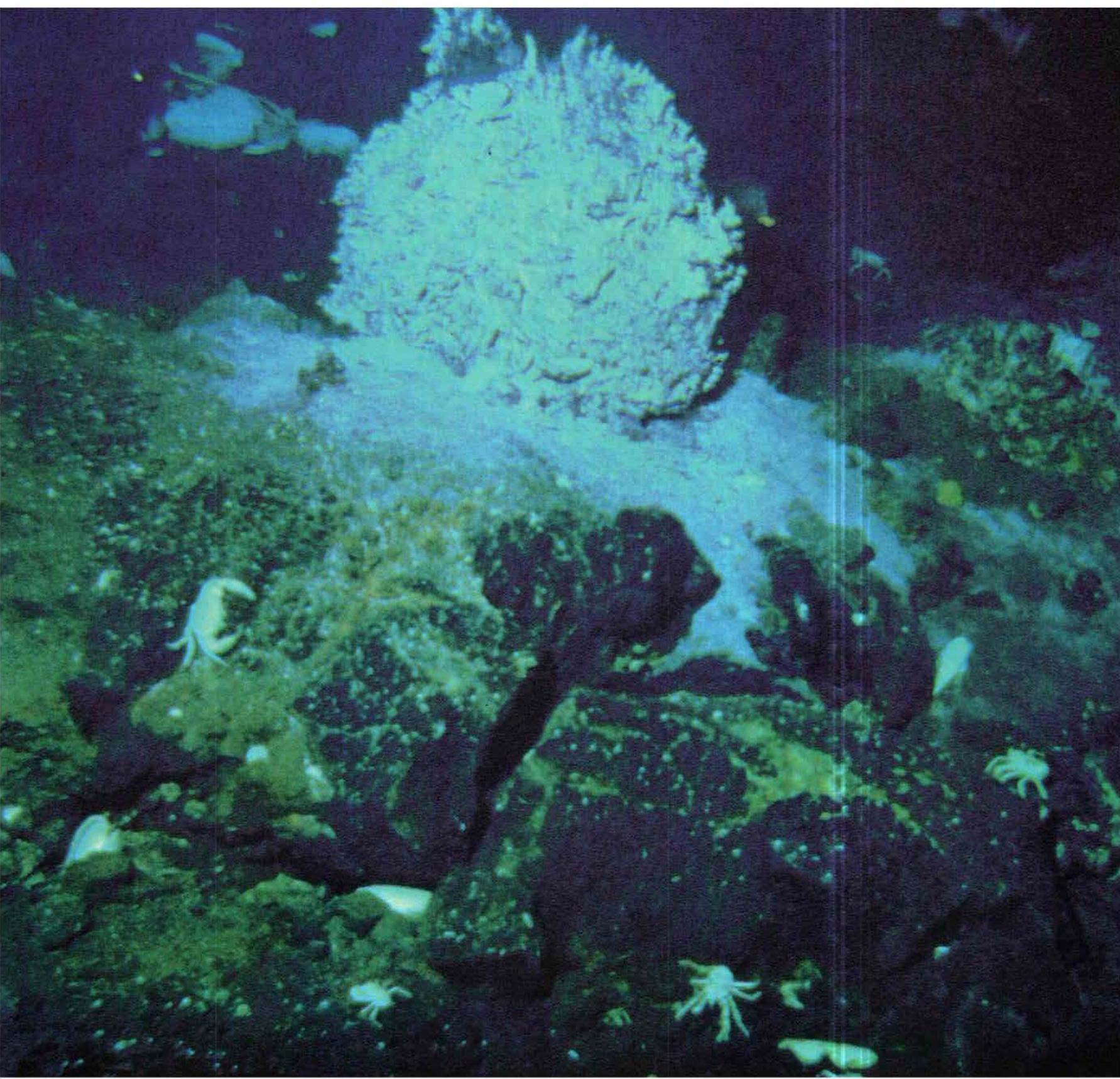


71



72. « **Boule de neige** » (1 m à 2 m. de diamètre). Elle est faite d'un cœur de sulfures recouvert d'une enveloppe organique blanche de vers polychètes (les vers de Pompéi) : espèce ou famille nouvelle baptisée *Alvinella pompejana*, en hommage au submersible Alvin qui l'a découverte au cours de l'expédition RISE. On voit aussi plusieurs Décapodes dont trois Galathées.

« **Snowball** » made up of a spherical core of sulphides with an envelope of Polychaetes (*Alvinella pompejana*) dubbed « Pompei worms ». The worms are enclosed in white tubes. The snowballs are aligned along a small open fissure next to sulphide-spewing chimneys. Temperatures inside the snowball are at least 200 °C. Photograph taken from the submersible Alvin during the RISE expedition.





73. **Trésor sous-marin.** Fragment de sulfures, riches en métaux, remonté des fonds de 2 600 m. Ce culot est oxydé sur la face externe, tapissé de cristaux de chalcopirite à l'intérieur. Le produit blanc est du sulfate. (photo prise sur le catamaran Lulu).

A metal-rich sample from 2 600 metres below sea level is photographed on the deck of the catamaran-barge Lulu, mother-ship of Alvin. The sample, a piece of a sulphide chimney, is oxidized on the outside and lined with chalcopyrite crystals within. The white material is sulphate.

Quelques références *Selected reading*

- Atlas de la Mer (Atlas of the Sea)** - Mitchel Beazley : London, 1976 et Robert Laffont : Paris, 1978, 208 p.
- Arcyana. **Famous, Atlas Photographique.** Gauthiers-Villars, CNEXO. Paris, 1978, 128 p.
- Ballard R.D. and Moore J.G. **Photographic Atlas of the Mid-Atlantic Ridge.** Springer-Verlag : New-York, 1977, 114 p.
- Bird, J.M., and Isacks B., Eds - **Plate Tectonics : Selected Papers from the Journal of Geophysical Research.** American Geophysical Union : Washington, 1972, 563 p.
- Coulomb, J., **Expansion océanique et dérive des continents** Presses universitaires de France, Paris, 1969.
- Degens, E.T. and Ross, D.A., eds. **Hot Brines and Recent Heavy Metal Deposits in the Red Sea.** Springer-Verlag : New-York, 1969, 600 p.
- Hallam, A., **Une révolution dans les sciences de la terre.** Ed. Seuil, Paris, 1976.
- Heezen, B.C. and Hollister, C.D. **The face of the Deep.** Oxford University Press : New York, 1971, 659 p.
- La dérive des Continents : la tectonique des plaques,** Pour la Science, Belin diffusion. Paris, 1980, 215 p.
- Le Pichon, X., Francheteau, J. and Bonnin J. - **Plate Tectonics.** Elsevier Scientific : Amsterdam, 1973, 300 p.
- Riffaud, C. and Le Pichon, X. - **Expédition Famous.** Albin Michel, Paris, 1976, 271 p.
- Wilson, J.T., **Continents Adrift : Readings from Scientific American.** W.H. Freeman : San Francisco, 1972.
- Press, F. and Siever R. - **Earth.** W. H. Freeman : San Francisco, 1978 (2nd. edition), 649 p.

ARTICLES SCIENTIFIQUES SCIENTIFIC PAPERS

- Arcyana**, 1975. Transform fault and rift valley from bathyscaph and diving saucer. *Science*, v. 190, pp 108-116.
- Ballard, R.D., Bryan, W.B., Heirtzler, J.R., Keller, G., Moore, J.G., and Van Andel, T.**, 1975. Manned submersible observations in the Famous area : Mid-Atlantic Ridge. *Science*, V. 190, pp 103-108.
- Ballard, R.D. and Grassle, F.**, 1980, Return to oases of the Deep. *Nat. Geographic*, V. 156, pp 689-705.
- Bellaiche, G., Cheminée, J.L., Francheteau, J., Hékinian, R., Le Pichon, X., Needham, H.D., and Ballard, R.D.**, 1974. Rift valleys inner floor : first submersible study. *Nature*, V. 250, pp 558-560.
- Caytrough**, 1979. Geological and geophysical investigation of the Mid-Cayman Rise spreading center : initial results and observations. In : *Maurice Ewing Series 2, Talwani, M, Harrison C.G., and Hayes, D.E. Eds., American Geophysical Union : Washington, D.C.*, pp 66-95.
- Corliss, J.B., Dymond, J.R., Gordon, L.S., Edmond, J.M., Von Herzen, R.P., Ballard, R.D., Green, K., Williams, D.L., Bainbridge, A., Crane, K. and Van Andel, T. H.**, 1979. Exploration of submarine thermal springs on the Galapagos Rift. *Science*, V. 203, pp 1073-1083.
- Cyamex**, 1978. Découverte par submersible de sulfures polymétalliques massifs sur la Dorsale du Pacifique Oriental par 21° N (Projet Rita) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences, série D*, V. 287, 1365-1368.
- Cyamex**, 1979. Massive deep-sea sulphide ore deposits discovered on the East Pacific Rise. *Nature*, V. 277, pp 523-528.
- Cyamex**, 1980. First manned submersible dives on the East Pacific Rise : General results, *Mar. Geophys. Res.*, in press.
- Francheteau, J., Juteau, T., and Rangin, C.**, 1979. Basaltic pillars in collapsed lava pools on the Deep Ocean Floor, *Nature*, V. 281, pp 209-211.
- Heezen, B.C., and MacGregor, I.D.**, 1973. The evolution of the Pacific. *Scientific American*, V. 229, pp 102-112.
- Heirtzler, J.R., and Brian, W.B.**, 1975. The floor of the Mid-Atlantic rift. *Scientific American*, V. 233, pp 78-90.
- Hékinian, R., Fevrier, M., Bischoff, J.L., Picot, P., and Shanks, W.C.**, 1980. Sulfide deposits from the East Pacific Rise near 21 °N. *Science*, in press.
- Juteau, T., Eissen, J.P., Francheteau, J., Needham, H.D., Choukroune, P., Rangin, C., Seguret, M., Ballard, R.D., Fox, P.J., Normark, W.R., Carranza, A., Cordoba, D., Guerrero, J.**, Homogeneous basalts from the East Pacific Rise at 21 °N : steady state magma reservoirs at moderately fast spreading centers, *Oceanologica Acta*, in press.
- Matthews, S.W.**, 1973. This changing earth. *National Geographic*, V. 143, pp 1-37.
- Normark W.R.**, 1980. Definition of the plate boundary along the East Pacific Rise off Mexico. *Marine Geodesy*, vol. 4, n° 1, pp. 29-43.
- Rise project group**, 1980. Hot springs and geophysical experiments on the East Pacific Rise, *Science*, in press.
- Turekian, K.K., Cochran, J.K., and Nozaki, Y.**, 1979. Growth rate of a clam from the Galapagos Rise hot spring field using natural radionuclide ratios, *Nature*, V. 280, pp 385-387.

ILLUSTRATIONS ET PHOTOGRAPHIES

- Page 10. Extrait de la carte « WORLD OCEAN FLOOR » par **B.C. HEEZEN** et **M. THARP**, 1977, Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University ; *United States Navy, Office of Naval Research*.
- Page 18. Extrait de « THE AGE OF THE OCEAN BASINS » par **W.C. PITMANN III**, **R.L. LARSON** et **E.M. HERRON**, 1974, Lamont-Doherty Geological Observatory of Columbia University ; *Geological Society of America*, 1974.
- Page 20 (bas). D'après Fig. 16 de « STRUCTURAL GEOMORPHOLOGY OF A FAST-SPREADING RIDGE CREST : THE EAST PACIFIC RISE NEAR 3°25'S » par **P. LONSDALE**, 1977, *Marine Geophysical Researches*, vol. 3 (3), p. 251-293 et « DEEPTOW STUDIES OF THE STRUCTURE OF THE MID-ATLANTIC RIDGE CREST NEAR LAT. 37°N » par **K.C. MACDONALD** et **B.P. LUYENDYK**, 1977 ; *Geological Society of America Bulletin*, vol. 88, p. 621-636.
- Page 20 (haut). D'après Fig. 7 de « WORLD-WIDE CORRELATION OF MESOZOIC MAGNETIC ANOMALIES AND ITS IMPLICATION » par **R.L. LARSON** et **W.C. PITMAN III**, 1977 ; *Geological Society of America Bulletin*, vol. 83, p. 3645-3662 ; et Fig. 14 de « LATE MESOZOIC EVOLUTION OF THE WESTERN PACIFIC OCEAN » par **R.L. LARSON** et **C.G. CHASE**, 1972 ; *Geological Society of America Bulletin*, vol. 83, p. 3627-3644.
- Page 21. D'après Fig. 1 de « STRUCTURAL GEOMORPHOLOGY OF A FAST-SPREADING RIDGE CREST : THE EAST PACIFIC NEAR 3°25'S » par **P. LONSDALE**, 1977, *Marine Geophysical Researches*, vol. 3 (3), p. 251-293.
- Photos 69 à 73. « EXPEDITION RISE » (Photos ALVIN), avec l'amabilité de **F. SPIESS**.

CYAMEX

a été organisé par le

CENTRE NATIONAL POUR L'EXPLOITATION DES OCÉANS

avec la coopération de la

NATIONAL SCIENCE FOUNDATION (USA)
SCRIPPS INSTITUTION OF OCEANOGRAPHY (USA) UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USA)
WOODS HOLE OCEANOGRAPHIC INSTITUTION (USA) NATIONAL GEOGRAPHIC SOCIETY (USA)
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

ont participé à sa préparation

Claude RIFFAUD
Fred SPIESS
Jacques DEBYSER, Xavier LE PICHON
et les membres du Comité Français des Submersibles

ont réalisé l'expédition

scientifiques

FRANCE	Pierre CHOUKROUNE, Jean FRANCHETEAU, Thierry JUTEAU David NEEDHAM, Claude RANGIN, Michel SEGURET
ETATS-UNIS	Robert BALLARD, Paul J. FOX, William NORMARK
MEXIQUE	Arturo CARRANZA, Diego CORDOBA, José GUERRERO

pilotes, ingénieurs, techniciens

Claude CAILLART
Robert KIENTZY (Canoë), Henri LE ROUX,
Georges ARNOUX, Jean-Michel NIVAGGIOLI,
Pierre PLASSEREAUD, Jean PORTEOUS, Henri LOSSOUARN,
Dominique SEMAC, William MARQUET

Le Commandant, les officiers et l'équipage du NADIR

ont contribué à la réalisation de

naissance d'un océan

Rufino TAMAYO

Jan OORTWIJN, Jean-Marie ESLINGER
Joyce GUICHARDOT-WIRRMANN
Myriam SIBUET, Janet STROUP,

René BLANCHET, Henri BOUGAULT, Paul J. FOX
Xavier LE PICHON, William MARQUET, Vincent RENARD

Jean VICARIOT, Guy PAUTOT

Raoul PIBOUBES
conseiller pour l'édition

CYAMEX

naissance d'un océan

- La campagne CYAMEX, en février - mars 1978, a permis à des géologues français, américains et mexicains d'explorer un secteur de la dorsale du Pacifique Est, à l'entrée du golfe de Californie. De vingt deux plongées par 2 600 mètres de fond, les chercheurs ont ramené une ample moisson d'observations et de découvertes.

Voici un choix de magnifiques photographies d'une qualité technique et artistique rarement atteinte dans de telles conditions. Elles témoignent du saisissement et de l'émerveillement des plongeurs lorsque les phares de la soucoupe Cyana leur révélèrent les fantasmagories des lacs de laves aux formes d'acropoles englouties, la palette colorée des dépôts hydrothermaux métallifères ou, auprès de sources chaudes, les oasis de vie peuplées d'espèces étranges.

Cet ouvrage retrace une étape nouvelle dans la découverte de la dorsale océanique, l'un des derniers grands traits de relief qu'il nous reste à connaître sur la planète. C'est un effort de plus pour saisir et interpréter les origines de la croûte océanique et la genèse toujours actuelle de la face de notre terre. C'est le constat sur place, par l'homme, du bien fondé de ses hypothèses avec tous les développements qu'impliquent la présence, la vision, le choix et le jugement humains.

birth of an ocean

Discoveries made by oceanographers have led during the past forty years to the wide acceptance of some radical views about the way the earth works, including the notion that the deep-sea floor is in a state of continuing growth along the axis of the Mid-Oceanic Ridge. Most of the investigations at sea are accomplished from surface ships but some tasks are best tackled by scientists on the ocean floor, where they can make direct observations and judgements and collect samples in a precise way. Gathered together in this book is a selection of the first photographs obtained from a manned submersible at the crest of the East Pacific Rise, a major segment of the Mid-Oceanic Ridge. The photographs were taken on the expedition CYAMEX in February and March 1978, when French, American and Mexican scientists made twenty-two dives on the East Pacific Rise at the mouth of the Gulf of California. Of excellent quality considering the conditions under which they were taken, the photographs record the shifting scene of recently cooled lava flows, variegated hydrothermal deposits, open fissures and strange fauna that were revealed by the lights of the submersible Cyana 2 600 metres below the surface of the sea. Various results of the expedition, among them the discovery of mounds of massive, metal-rich sulphides and of large areas once covered by lakes of lava, represent useful advances in our understanding of the processes that create and shape the igneous oceanic floor, and of how these processes may differ from one part of the Mid-Oceanic Ridge to another.



Centre National pour l'Exploitation des Océans