

Session 5 : Stabilité des Pentas - Etudes géotechniques - Prélèvements
d'échantillons

INSTABILITES SOUS-MARINES ETUDIEES PAR SUBMERSIBLES

Bruno Savoye

IFREMER, Département Géosciences Marines, B.P. 70,
29280 Plouzané, France

Pendant plusieurs décennies les géologues considèrent les fonds marins comme des zones monotones, mornes et sans grand intérêt. Depuis la fin de la dernière guerre mondiale, l'essor conjoint de la géologie marine et des techniques d'exploration sous-marine a montré à quel point cette conception était erronée. Que ce soit sur le plateau continental, les pentes ou les plaines abyssales, les fonds marins sont le siège de phénomènes géologiques actifs à toutes les échelles, parfois spectaculaires et de grande ampleur.

La pellicule sédimentaire qui recouvre les fonds océaniques constitue un véritable livre d'histoire dans lequel sont archivés les événements qui ont affecté notre planète et qui, tous, ont eu des conséquences sur les sédiments. L'intérêt de l'étude des sédiments marins ne se limite pas alors à une simple amélioration des connaissances sur les sédiments, mais donne de précieuses indications au géologue sur l'histoire de la Terre et l'évolution au cours du temps des milieux, des climats.

Une des grandes leçons de ces quinze dernières années a été la mise en évidence de l'importance des instabilités sédimentaires (ou remobilisation des sédiments) dans le bilan sédimentaire global. Parmi les différents types d'instabilités sédimentaires, les glissements sous-marins comptent parmi les plus spectaculaires et les plus difficiles à prédire et à étudier, alors que leurs conséquences peuvent être tout à fait catastrophiques.

L'IFREMER mène depuis quelques années un projet de recherche sur ces phénomènes ("Processus sédimentaires et Instabilités sur les Pentas"). Ces études, menées en particulier au large de Nice (France) sur une zone que l'on sait active, ont pour objectifs : l'amélioration des connaissances sur les processus gravitaires, une meilleure définition du cadre géologique régional, la cartographie de l'évolution des instabilités sédimentaires au cours du temps, mais aussi l'étude et l'évaluation des instabilités sédimentaires actuelles dans cette zone.

Dans ce cadre toute une panoplie d'outils modernes d'exploration a été mise en oeuvre. Observation directe interactive, finesse et capacité d'intervention sur le fond, le submersible s'avère, à la lumière de cette expérience et d'expériences similaires menées de par le monde, un outil très efficace et performant pour l'étude des sédiments, à la condition que soit préalablement défini avec précision les objectifs de plongée.

Malgré l'évolution rapide des techniques actuelles d'exploration sous-marine et même si de nouveaux systèmes d'observation (ROV vidéo) devraient en partie venir prendre le relais pour certaines missions particulières, le submersible restera encore pour longtemps un outil-clé pour l'étude fine des sédiments marins. L'évolution des préoccupations des scientifiques vers une certaine quantification des processus devrait se traduire à l'avenir par une relative diversification des missions du submersible.

Session 5 : Slopes stability - Geotechnical studies - Sampling

SUBMARINE INSTABILITIES AND SUBMERSIBLES

Bruno Savoye

IFREMER, Département Géosciences Marines, B.P. 70,
29280 Plouzané, France

During the last decades, geologists pictured the sea-floor as flat, invaried and dull areas. Since the end of the Second World War, this sketchy approach appeared to be unaccurate as marine geosciences developed and new high-technology marine exploration tools were designed. Indeed, the sea-floor is an area of contrasts, where various active processes occur at different water depths.

The sedimentary cover can easily be compared to a history book, in which the whole story of the Earth is written. By studying marine sediments, one can infer various data such as those related to the climate or the sea-level changes.

Since the last fifteen years, the sediment instability appears to be more and more important as a part of global sedimentary budget. Among the various types of sedimentary instabilities, submarine slides are probably the most spectacular and the hardest to study and predict, although their consequences on human and industrial marine activities can be dramatic.

Therefore IFREMER is conducting a research project on this topic since four years. An area off Nice (France) has been particularly studied. It is of particular interest, because of its recent activity. Mapping and also instability area detection have been carried out. A large number of various equipments have been used to study the area. With the possibility of direct interactive observation and highly accurate submarine in-situ operation, the submersible is an extremely efficient tool for sediment studies, but diving purposes have to be precisely defined to provide useful information.

In the Future, the submersible will still be a major key-tool to study marine sediments, although new systems such as video-ROV will be used as a complement.

The present evolution of scientific purposes aiming at a better quantitative comprehension of geological processes might broaden the range of submersible applications in the near future.

INSTABILITES SEDIMENTAIRES SOUS-MARINES ETUDIEES PAR SUBMERSIBLES

B. SAVOYE, IFREMER DEPARTEMENT GEOSCIENCES MARINES, B.P. 70 PLOUZANE,
FRANCE

Il y a seulement cinquante ans, le fond des océans n'était pour les scientifiques qu'une mystérieuse contrée, véritable face cachée de la terre, peut-être encore plus mal connue que la lune, son propre satellite. Depuis la fin de la dernière guerre mondiale, la relance des activités d'exploration s'est accompagnée d'un renouvellement spectaculaire des concepts de formation et d'évolution du globe avec notamment la "révolution de la Tectonique des Plaques". Ce renouveau, mais aussi l'adaptation au domaine civil de techniques d'investigation très sophistiquées, développées à l'origine par les militaires, a complètement modifié nos connaissances de cette surface cachée de la Terre. Parmi les nombreuses découvertes réalisées au cours des dernières décennies, il convient de citer la mise en évidence des phénomènes d'instabilités sédimentaires sous-marines et de leur importance tant à l'échelle géologique qu'à l'échelle humaine pour les problèmes d'aménagement et d'exploitation du milieu marin. Même si depuis quelques années la géologie tend à devenir de plus en plus une science quantitative, c'est avant tout une science naturaliste ; c'est pourquoi le géologue veut pouvoir observer l'objet de ses recherches. Les découvertes des géologues marins et des sédimentologues, en particulier, n'ont été possibles que grâce au développement et à la mise en oeuvre d'une technologie de pointe orientée vers l'observation des fonds. C'est tout particulièrement le cas des submersibles habités, qui permettent au géologue de travailler presque dans les mêmes conditions qu'à terre et par là même de s'affranchir temporairement de l'effet de masque engendré par la tranche d'eau.

RAPPEL HISTORIQUE

La fin du 19^{ème} siècle fut une période faste pour l'océanographie avec notamment la très fameuse expédition du navire CHALLENGER qui, pendant plusieurs années, sillonna les océans et permit d'amasser une quantité considérable de données de toutes sortes sur un milieu jusqu'alors inconnu. Il ne faut pas oublier non plus le rôle moteur joué au cours de cette période par le Prince Albert de Monaco, qui, dès 1885, prit la tête de nombreuses expéditions océanographiques en Atlantique central et dans les régions arctiques. La période de l'entre-deux-guerres fut bien moins riche en résultats même si la mise au point des premiers sondeurs acoustiques date de cette époque. La seconde guerre mondiale donna une nouvelle impulsion aux recherches océanographiques. Ce regain d'activité ne tarit pas avec le retour de la paix et se prolongea au contraire pendant les années de l'après-guerre. Une des contributions des plus nouvelles et originales fut le fait d'un suédois, Hans Peterson, qui eut l'idée d'étudier de manière systématique la sédimentation dans les profondeurs des océans, là où aucune érosion n'était plus censée se produire. Avec l'ALBATROSS, un superbe quatre-mâts, il entreprit, de juillet 1947 à octobre 1948, un tour complet de la Terre en suivant approximativement l'Equateur. Si les résultats de cette expédition eurent, à leur époque, un énorme retentissement du point de vue scientifique, ce sont surtout les techniques élaborées à l'occasion de ce périple par Peterson et ses collègues : Weibull, Kullenberg, Koczy, Arrhénius, etc... qui marquèrent l'évolution de l'océanographie moderne (techniques de prélèvements, carottiers grande longueur, ...).

En France, cette période fut marquée par les grands débuts de l'océanographie moderne avec la mise au point du scaphandre autonome Cousteau-Gagnan, le développement des premiers bathyscaphes, l'armement de la Calypso, la création du fameux laboratoire de géologie sous-marine de J. Bourcart à la Sorbonne et quelques années plus tard, en 1955, du Laboratoire d'océanographie physique du Muséum National d'Histoire Naturelle.

Les années 60 et 70 virent s'accroître de façon considérable les budgets et les efforts consacrés à l'océanographie dans le monde avec le développement et la mise au point de nombreux outils d'exploration parmi lesquels il convient de citer en particulier la

prospection sismique, les grands forages océaniques et les submersibles. Dans cette course vers la mer, la France, avec la création du CNEXO (à l'origine de l'IFREMER) et la construction d'une véritable flotte océanographique, sans avoir la prétention de vouloir rivaliser avec les réalisations des Etats-Unis, se retrouva très bien placée.

Dans certains domaines, comme l'intervention sous-marine, la France peut même s'enorgueillir d'occuper à l'heure actuelle une place de premier plan dans le monde.

C'est dans ce cadre historique, où chaque progrès technique s'accompagne de progrès décisifs sur le plan des connaissances, qu'il faut resituer l'étude des sédiments marins.

INTERET DE L'ETUDE DES SEDIMENTS

Qu'est-ce qu'un sédiment ? D'après le Dictionnaire de la Géologie de Foucault et Raoult : un sédiment est "un ensemble constitué par la réunion de particules plus ou moins grosses ou de matières précipitées ayant, séparément, subi un certain transport". Ces particules peuvent avoir plusieurs origines. Elles peuvent résulter de l'altération des roches à la surface des continents ou sous l'eau, elles peuvent être le résultat d'une activité biologique ou être synthétisées par voie chimique. Quelque soit leur origine, ces particules sont toutes destinées à participer à la formation des sédiments et la mer est, le plus généralement, le lieu ultime où se concentrent et se répartissent tous ces différents matériaux. Mais entre le moment où une particule devient mobilisable et le moment où se constitue le sédiment, puis la roche sédimentaire proprement dite, un long scénario s'ébauche et se développe jusqu'à un dénouement qui va dépendre étroitement de la nature des particules, des agents de leur transport et du milieu de sédimentation. Parce qu'elle est très sensible à tous ces facteurs et qu'elle constitue un reflet fidèle de l'environnement au moment de son dépôt, la couverture sédimentaire qui recouvre la quasi-totalité des fonds marins est d'un grand intérêt pour le géologue, car elle constitue un véritable livre d'histoire dans lequel sont archivés les événements qu'a connus notre planète et qui, tous, ont eu des conséquences sur les sédiments.

A partir de l'étude des sédiments le géologue peut donc reconstituer l'évolution au cours du temps, des milieux, des climats, reconstituer l'histoire de la terre et l'évolution biologique dont elle a été le théâtre. Les sédiments sont donc des témoins privilégiés de l'évolution du système Terre. Toute la science du sédimentologue consiste à savoir comment interroger ces témoins et comment leur faire dire tout ce qu'ils savent.

L'étude des sédiments peut faire l'objet de nombreuses applications dans le domaine industriel (recherche de ressources, tenues d'ouvrages posés ou ancrés sur le fond, études d'impact, ...).

QUELQUES EXEMPLES D'INSTABILITE SEDIMENTAIRE

On a vu que les particules, issues en particulier de l'érosion des continents, aboutissaient presque toutes dans les océans et formaient les sédiments. Envisager un terme au devenir de ces particules correspondrait à un schéma un peu simpliste et réducteur. Il existe en effet dans les océans de nombreuses forces (courants, gravité, tempêtes, ...) capables de remobiliser et de redistribuer les matériaux meubles en structures nouvelles, qui, elles-mêmes, pourront être remobilisées à leur tour.

Parmi les manifestations spectaculaires de ces redistributions on peut prendre l'exemple original du remaniement des fonds marins par les quilles des icebergs, tel qu'on a pu le mettre en évidence au large du Canada (par des profondeurs d'eau allant jusqu'à 150 m) ou en Mer du Nord (Fig. 1). Comprendre et modéliser ce type de remaniement est essentiel, d'un point de vue fondamental, pour comprendre le mode de fonctionnement et l'évolution au cours du temps des plateaux continentaux dans les régions soumises à l'action des icebergs. Cela peut avoir parfois un intérêt plus immédiat et appliqué : par exemple, pour concevoir les installations nécessaires à la production et à la collecte du pétrole et du gaz du champ Hibernia, qui se trouve au large de Terre-Neuve dans une zone d'échouage des icebergs (Fig. 2), il était indispensable de connaître la fréquence et la répartition des contacts des icebergs avec le fond et les forces auxquelles le fond était soumis lors de ces contacts. A l'aide d'outils de reconnaissance de surface, comme le sonar, la sismique on a pu relever les traces du passage des icebergs, déterminer la

géométrie des sillons (10 à 100 m de largeur, quelques mètres de profondeur, plusieurs kilomètres de longueur). Mesurer les propriétés des sédiments, modéliser précisément les interactions iceberg-fond n'était possible que grâce à l'utilisation du submersible et c'est ce qui a été réalisé en 1984 et 1985 par les chercheurs de l'I.O.B. (Institut Océanographique de Bedford, Canada) et les ingénieurs de Mobil Oil Canada Limitée.

Parmi tous les types d'instabilité sédimentaire, les glissements sous-marins sont très certainement parmi les plus spectaculaires et les plus difficiles à prédire, alors que leurs conséquences peuvent être tout à fait catastrophiques. Bien sûr, ce phénomène de glissement de terrain est bien connu à terre. Sous la mer ces événements sont très fréquents. Ils peuvent avoir différentes causes, différentes tailles, mais du fait qu'ils affectent des sédiments souvent non consolidés entourés du fluide qu'est l'eau de mer, ils peuvent atteindre des proportions gigantesques (plusieurs millions de m³) et être à l'origine de véritables catastrophes. Tout comme pour les glissements terrestres, on dispose d'une classification très précise pour ces glissements qui vont du simple éboulis de blocs aux courants de turbidité, véritables avalanches sous-marines.

Ces grands glissements peuvent avoir des répercussions désastreuses pour la frange littorale, par exemple en générant des raz de marée. Lors du tremblement de terre qui frappa l'Alaska en 1964, une partie des installations portuaires de la ville de Valdez glissa brutalement dans la mer, emportant tout sur son passage (Fig. 3). Ce mouvement de terrain engendra un tsunami, qui revint sur la côte et détruisit une partie de la ville. La figure 4 représente une photographie aérienne de la ville de Valdez en Alaska, prise après le grand tremblement de terre de 1964, on y distingue parfaitement la zone inondée, qui n'a plus de neige.

Un exemple encore plus classique est constitué par le fameux glissement de Grand Bank, qui eut lieu au large de la Nouvelle Ecosse et de Terre-Neuve en 1929. Il fut déclenché par un séisme de magnitude 7 sur l'échelle de Richter et fut à l'origine d'un tsunami, qui provoqua l'inondation d'une grande partie des côtes sud de Terre-Neuve, causant la mort de 28 personnes. Des glissements de grande envergure affectèrent la pente continentale dans un rayon de 100 km autour de l'épicentre du séisme (Fig. 5), créant un puissant courant de turbidité qui a charrié sur des centaines de kilomètres quelques 200 km³ de graviers, de sables et de boues. Des câbles télégraphiques sous-marins furent sectionnés presque instantanément par les glissements près de l'épicentre, d'autres le furent plus tard, sous l'impact du courant de turbidité. Le dernier câble fût sectionné 13 heures après le séisme. La vitesse initiale du courant de turbidité à l'origine de ces catastrophes fût estimée comme étant de l'ordre de 65 km/h.

PROBLEME METHODOLOGIQUE D'ETUDE DES SEDIMENTS MARINS

Bien qu'identique dans ces objectifs, le travail du géologue marin n'est pas de même nature que celui du géologue terrestre. L'effet de masque engendré par la tranche d'eau et le drapage fréquent des séries anciennes sous une fine couverture de vase, interdisent en effet le plus souvent l'étude de terrain classique. Pour s'affranchir de ces problèmes le géologue marin emploie différents outils d'investigation que l'on peut grossièrement regrouper en trois catégories : (1) les outils d'observation indirecte plus communément appelés outils géophysiques très souvent basés sur l'utilisation des ondes acoustiques (ce sont les sonars, les sondeurs, la sismique par exemple), (2) les prélèvements et mesures sur le fond, (3) les outils d'observation directe du fond (caméra ponctuelle, robot vidéo, submersibles).

Le submersible est employé pour différents types de mission et suivant différentes orientations. Outil d'observation directe le plus performant, sa mission principale consiste le plus souvent dans la calibration des différentes données acquises avec les outils d'exploration indirecte.

Premier type de mission : la calibration des données sismiques. La figure 6 illustre cet aspect du travail du submersible. Elle représente une coupe à travers les sédiments situés par 2 200 m de fond au pied de la pente continentale au large de Menton (Sud de la France). Dans cette zone, ainsi que l'indique le profil sismique (sorte de coupe en tranche du sous-sol), près de 600 m de sédiments semblent découpés à l'emporte-pièce. En plongeant avec la soucoupe CYANA à cet endroit, on a pu décrire pour la première fois

l'ensemble de la colonne sédimentaire de la cote -2 200 m à la cote - 1 500 m. Par extension de ces informations au reste de la zone, grâce aux profils sismiques, on a pu reconstituer dans le détail l'histoire de la région depuis 20 millions d'années, connaître les variations du niveau de la mer, etc ... (Savoie et Piper, sous presse).

Deuxième type de mission : la calibration des images sonar. Depuis quelques années, les sonars latéraux sont devenus des outils importants pour la géologie marine profonde et plus particulièrement pour l'étude des sédiments marins. Leur apparition a considérablement enrichi notre connaissance de la dynamique sédimentaire profonde, tout en modifiant de façon sensible l'approche, que l'on avait, jusqu'à présent, de ces problèmes avec des outils moins performants. Les sonars, qui permettent d'avoir une vision panoramique du fond de la mer avec des résolutions variant de 50 m à moins d'un mètre, permettent de couvrir des zones importantes pendant des temps à la mer raisonnables. Pour rester simple, disons que ce type d'outil donne une sorte de photographie "aérienne" acoustique du fond (voir figure 7a, qui décrit la vallée sous-marine du Var au large de Nice). Sur cette mosaïque d'images sonar, on distingue des zones gris clair et des zones plus sombres, ainsi que plusieurs échos de différentes natures. La géométrie des objets, leur disposition sur le fond sont connues avec précision grâce à ces images (voir échelle de la figure). Par contre leur nature exacte reste, à ce stade, hypothétique. Grâce à une plongée sur cette zone, on a pu mettre un nom sur chacun de ces échos et produire une carte des dépôts et des figures sédimentaires sur le fond. La figure 7b illustre la transition entre le faciès gris clair, qui correspond à des vases silteuses et le faciès gris foncé, qui correspond à un fond tapissé de galets, telle qu'on a pu l'observer avec la CYANA en 1986. La plongée réalisée dans cette zone a donc permis de passer du stade carte de faciès acoustiques au stade de la carte géologique.

L'autre point fort du submersible réside dans sa capacité à prélever, en des points-clés parfaitement contrôlés, des échantillons avec la pince du (ou des) bras manipulateur (s), ou avec un petit tube carottier tenu par la pince et enfoncé horizontalement ou verticalement dans le sédiment (Fig.8).

Mis au point plus récemment, des outils ont permis de réaliser des mesures sur le fond en temps réel dans les sédiments. Ces outils sont, soit autonomes (Module Géotechnique IFREMER par exemple), soit mis en oeuvre à partir du submersible (Fig.9, scissomètre permettant la mesure in-situ de la cohésion des sédiments). Le submersible permet de choisir avec précision le site de la mesure, de contrôler le fonctionnement du système et de valider directement la mesure. Le développement de ce type d'outil, qui représente un des aspects importants du projet de recherche que nous menons à Brest, est présenté dans ce volume par P. Cochonat.

Parfois, lorsque les conditions d'affleurement sur le fond sont favorables, on peut étudier, avec le submersible, la structure même des corps sédimentaires. Dans certains cas, seule l'utilisation du submersible permet de réaliser ce travail. Exemple : grâce aux sonars, on a pu mettre en évidence, ces dernières années, l'existence fréquente, le plus souvent sur les pentes continentales dans les zones de transit d'avalanches sous-marines, de champs de dunes géantes par grande profondeur d'eau. Hautes de plusieurs mètres, ces dunes ont une longueur d'onde, qui avoisine plusieurs dizaines de mètres. Elles sont malheureusement composées le plus souvent de matériaux très grossiers et de ce fait leur structure interne ne peut être étudiée par les moyens acoustiques traditionnels. L'équipe de l'I.O.B. (Institut Océanographique de Bedford) a pu, à l'occasion d'une plongée en submersible, lever une coupe à travers une de ces grandes dunes de galets au large de la Nouvelle-Ecosse. Cette observation unique et exceptionnelle a permis de comprendre la dynamique des processus à l'origine de leur mise en place et de comparer la structure de ces dunes avec d'autres modèles de dunes décrites à terre dans d'autres environnements (voir Fig.10).

Le submersible est en fait le seul outil à la disposition du géologue marin, qui lui permette de faire de la véritable géologie de terrain, comme il pourrait en faire à terre. Il peut en utilisant les observations submersibles et d'autres types de données (sonar, bathymétrie, sismique, carotte,...) reconstituer les paysages sous-marins. Ce type de reconstitution est illustré par la figure 11 qui décrit les paysages rencontrés au droit de l'aéroport international de Nice.

L'ETUDE DES INSTABILITES SEDIMENTAIRES AU LARGE DE NICE

Ces problèmes de remobilisation sédimentaire et plus particulièrement d'instabilités sédimentaires sur les pentes sous-marines intéressent beaucoup l'IFREMER, qui, de ce fait, mène des études dans ce domaine depuis de nombreuses années. Il y a trois ans, l'équipe de géologues du Centre IFREMER de Brest, qui étudie ces phénomènes (J.F. Bourillet, P. Cochonat, J. Guillaume, G. Ollier et B. Savoye), a décidé d'axer ses efforts sur l'étude d'une zone chantier prioritaire : la zone de Nice-Baie des Anges (France) (voir localisation sur Fig. 12). Cette zone présente l'avantage d'être active du point de vue des instabilités sédimentaires (événements catastrophiques récents), relativement facile à couvrir pendant des temps à la mer raisonnable (quadrilatère de 60 x 160 km) et d'un accès facile (facilités logistiques).

Le 16 octobre 1979, un glissement sous marin de grande ampleur eut lieu au large de Nice, faisant disparaître dans la mer une partie du chantier de l'aéroport international de Nice. Au même moment, après une baisse relative du niveau de la mer, un raz de marée de plusieurs mètres submergea le littoral sur un front de 100 km environ. Cette catastrophe causa, à l'époque, la mort de plusieurs personnes. Quelques 3 h 45 et 8 h après ces événements, deux câbles téléphoniques situés respectivement à 80 km et 110 km de Nice ont été sectionnés (voir fig. 12). Les études réalisées après cette catastrophe ont démontré qu'ils avaient été sectionnés par une avalanche sous-marine, qui, empruntant le canyon sous-marin puis la vallée sous-marine du Var se dispersa finalement dans la plaine abyssale ligure, au pied de la pente continentale corse. Cette avalanche est la conséquence d'un glissement ayant affecté un volume important de sédiments du haut de pente de la Baie des Anges. Dans le cadre d'une expertise destinée à définir quel était le phénomène exact responsable de ces diverses manifestations, puis pour son propre compte, le CNEXO (devenu l'IFREMER) a entrepris l'étude détaillée, depuis la côte jusqu'à la plaine abyssale, de toute la zone située au large de Nice. Cette étude a été menée en collaboration avec de nombreuses équipes extérieures, dont le Laboratoire de Géodynamique sous-marine de Villefranche sur Mer, l'Institut Océanographique de Bedford (Canada) et l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy. Un volume très important de données est maintenant disponible sur cette zone. Ce sont, entre autres, des cartes bathymétriques très précises, des dizaines de prélèvements du fond (sous forme de carottes de quelques mètres de profondeur, le plus souvent), près de 5000 kms de profils sismiques, des levés avec les sonars latéraux SEAMARC et SAR, ainsi que 26 plongées réalisées avec la CYANA depuis 1980.

Il n'est pas dans mon propos de présenter ici les résultats obtenus au cours de ces diverses missions. Ceux-ci ont déjà fait l'objet de nombreuses publications dans des revues scientifiques spécialisées et de diverses communications dans des congrès. Il est par contre important de noter que l'emploi du submersible a été déterminant pour la réalisation de ce projet. Ont été réalisées sur ce chantier avec la soucoupe CYANA : des plongées de calibration de profils sismiques, de données sonar, des prélèvements, etc..., bref presque tous les types de "missions submersible", que j'ai décrits précédemment.

C'est en particulier sur ce chantier qu'ont été réalisées, en 1986, les premières plongées sur des cibles identifiées à partir d'images sonar SAR. La remarquable efficacité du couple SAR/Submersible avait, à cette occasion, pu être démontrée en particulier dans des zones sans grands reliefs, zones réputées jusqu'alors comme inintéressantes pour le submersible. Les six photographies qui constituent la figure 13 illustrent assez bien les trois aspects d'un glissement sous-marin à savoir : (1) l'érosion ou la mobilisation de sédiment, (2) le transport et enfin (3) le dépôt des sédiments remaniés. D'un autre point de vue, on peut dire que cette succession de figure traduit assez bien la succession de l'amont vers l'aval des différents types de fonds, que l'on peut observer avec un submersible dans ce type d'environnement sédimentaire sur une pente continentale (Fig. 14).

Au delà de simples observations en submersible, un véritable faisceau d'informations et d'observations à différentes échelles a confirmé l'existence de courants susceptibles de mettre en mouvement des masses importantes de sédiment. A l'échelle de l'image sonar,

il s'agit par exemple de la découverte de l'immense champ de dunes géantes qui occupe la quasi-totalité du fond du canyon du Var de 1000 m à 2000 m de profondeur d'eau (Fig. 14). Ces dunes géantes ont en moyenne plusieurs mètres de haut (jusqu'à 8 m) et une longueur d'onde variant de 30 à 120 m. Compte-tenu du facteur d'échelle, le sonar est l'outil le plus approprié pour l'étude de ces figures sédimentaires. Néanmoins les plongées réalisées avec le submersible sur le fond du canyon du Var au dessus de ce champ de dunes ont permis de réaliser des observations importantes. Elles ont tout d'abord permis de confirmer les interprétations sonar, à savoir la nature construite de ces dunes (ce ne sont pas comme on a pu le penser à un moment, un simple artéfact, image de la stratification des couches constituant le fond du canyon ; voir Fig. 13 C), elles ont permis aussi de confirmer l'extraordinaire continuité des crêtes de ces dunes, ainsi que leur dissymétrie (la face la plus abrupte est dirigée vers l'aval). Elles ont ensuite apporté des informations importantes concernant l'origine de ces rides, qui sont bien des figures de courants, courants particulièrement violents puisque capables de mobiliser des galets de près de 20 cm de diamètre, parfois plus. L'observation directe du fond de la mer par submersible, combinée avec l'utilisation d'autres outils d'exploration, a donc permis d'identifier sur le site niçois : différents types d'instabilités sédimentaires, différents types de processus gravitaires et de nombreux types de dépôts gravitaires.

Ce type d'étude de dépôts actuels peut permettre de mieux comprendre les séries fossiles déposées dans ce type d'environnement de bas de pente, en particulier des dépôts de "deep-sea fans" (éventails détritiques sous-marins profonds), qui constituent depuis quelques années des cibles pétrolières importantes (champ de Frigg en Mer du Nord par exemple). Bien sûr ce type d'étude est destiné avant tout à améliorer nos connaissances sur les instabilités sédimentaires et les risques qui leurs sont associés. Du point de vue de l'"utilisateur" de la pente et du talus continental, deux facteurs seront particulièrement importants à considérer lors de la conception et de la mise en place de structures ou d'objets sur le fond ou le déploiement d'outils sur ou près du fond : ce sont le facteur temps et le facteur d'échelle des processus affectant la zone en question. Le facteur temps concerne aussi bien la fréquence de récurrence des événements contraignants que la durée de ces mêmes événements. Le facteur d'échelle ne concerne pas simplement la largeur des zones d'activité des phénomènes mais aussi, et cela est très important, l'aspect volumétrique de ces processus. A l'heure actuelle notre connaissance des processus affectant les pentes continentales reste relativement, limitée tout au moins du point de vue quantitatif. Or l'on sait maintenant que des glissements sous-marins peuvent affecter des pentes très faibles. Il semble donc que tant que nous ne pourrons pas mieux mesurer, quantifier ces phénomènes, il faudra apporter la plus extrême attention au choix des sites lors de la mise en place d'ouvrages sur le fond dans ces zones sensibles et, plutôt que de vouloir construire des ouvrages capables de résister à telle ou telle contrainte supposée, essayer de trouver des zones d'implantation présentant un risque minimal.

CONCLUSION

Le métier du géologue c'est avant tout décrire et observer. Malgré l'évolution récente de ce métier vers une plus grande quantification des phénomènes (évolution qui devrait se poursuivre, voire s'accroître dans les années à venir), cet aspect naturaliste du métier du géologue constituera encore longtemps la base de son travail.

De ce point de vue le submersible habité constitue un outil essentiel, même si son emploi exige de prendre de nombreuses précautions, et restera toujours, pour de nombreuses raisons, relativement limité. Dans le domaine de l'étude des sédiments marins, le couple sonar/submersible est particulièrement performant et permet l'utilisation du sous-marin dans des environnements (en particulier fonds très plats) et pour des missions (études des figures sédimentaires, mesures in-situ, ...), qui, jusqu'à présent, n'étaient pas envisageables.

Dans un avenir plus ou moins proche il est certain que les missions du submersible devraient évoluer avec l'arrivée de nouveaux outils d'exploration (ROV, navire foreur léger NEREIS, laboratoires d'observation et d'expérimentation in situ, ...), capables de prendre le relais du submersible pour certaines missions, mais, dans la plupart des cas, la présence directe de l'homme sur le fond restera déterminante tant pour l'observation fine

des fonds dans des environnements complexes ou chahutés, que pour la mise en oeuvre ou le contrôle d'outils spécifiques à partir du submersible. En ce qui concerne l'observation directe des fonds, trois améliorations majeures sont attendues : l'amélioration de la vision des fonds (portée des projecteurs, restitution vidéo de paysages faiblement éclairés, ...), l'aide à la définition des dimensions et des échelles sur le fond et l'amélioration des échanges fond/surface (positionnement, échange d'informations complexes de type image vidéo du fond, croquis, etc...). Dans ce contexte la technicité du plongeur scientifique devra être de plus en plus importante, ce qui n'ira pas sans poser le problème de l'accessibilité de ce type d'outils par des équipes non-spécialisées dans les opérations sous-marines.

La compréhension des sédiments marins, qui est indispensable à la compréhension de l'histoire de la Terre, à la détection des ressources minérales et énergétiques, à l'aménagement de notre espace de vie et à la protection de son environnement, exige, on l'a vu, une technologie de pointe, à la fois pour l'acquisition et pour l'interprétation des données. Le développement, en France, de cette technologie passe par une coopération active entre les scientifiques de l'IFREMER, les scientifiques de l'Université et du C.N.R.S. et les ingénieurs. La France est un des rares pays qui dispose de deux submersibles habités civils capables d'intervenir par grande profondeur d'eau. Ces deux submersibles, la CYANA et le NAUTILE, ne sont pas concurrents comme certains auraient tendance à le penser, parfois ; ils sont très complémentaires. Certes le NAUTILE permet d'emporter et ramener en surface une masse utile importante, mais ses capacités d'observation et sa mobilité sur le fond sont très limitées par rapport à celles de la CYANA. Celle-ci, certes limitée du point de vue de sa capacité d'emport, est un merveilleux outil d'observation des fonds marins, qui a déjà rendu des services inestimables à la communauté française. Mais sa mission n'est pas terminée et pour peu qu'on s'en donne les moyens, elle devrait rendre encore beaucoup de services aux géologues français et européens. Avant de mobiliser énergie, compétences et budget pour réaliser de nouveaux outils, il me semble que la sagesse voudrait que nous sauvagions nos acquis avant de sacrifier à d'hypothétiques prototypes "miracle", un outil aussi formidablement bien adapté à sa mission que la CYANA.

Notre vieille planète, soumise à la pression d'une humanité grandissante, est encore loin d'avoir livré tous ses secrets. La mer, vaste désert aux richesses inexploitées, constitue pour l'homme une raison d'envisager son avenir sur terre avec optimisme. Elle nous réserve encore d'innombrables surprises. La profession de géologue marin et plus particulièrement de sédimentologue marin est de ce point de vue une profession d'avenir, car elle sera vitale pour le développement de l'activité humaine sur le fond des mers au fur et à mesure de l'augmentation de la pression économique mondiale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- Cochonat P., Lenat J.F., Bachelery P., Boivin P., Corniglia B., Deniel C., Labazuy P., Lipman P., Ollier G., Savoye B., Vincent P. et Voisset M., 1990. Importance des dépôts gravitaires dans la mise en place d'un système volcano-sédimentaire sous-marin (Volcan de la Fournaise, Ile de la Réunion). *C.R.Acad.Sci.*, t. 311, Série II, p. 679-686.
- Coulter H.W. et Migliaccio G., 1969. *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 542-A.*
- Hughes-Clarke J.E., Shor A.N., Piper D.J.W. et Mayer L.A., 1990. Large-scale current-induced erosion and deposition in the path of the 1929 Grand Banks turbidity current. *Sedimentology*, v. 37, p. 613-629.
- Menard H.W., 1964. *Marine geology of the Pacific.*, Mc Graw-Hill, New-York, 271 p..
- Peterson H., 1954. *La croisière aux abymes*, Amiot-Dumont, Paris, 232 p..
- Reimnitz E. et Barnes P.W., 1974. Sea ice as a geologic agent on the Beaufort Sea shelf of Alaska. Dans : J.C. Reed et J.E. Sater, *The coast and shelf of the Beaufort Sea. Actes du Coll. Beaufort Sea Coast and Shelf Research*, Arctic Inst. of North America, Arlington, Va., p. 301-353.
- Robe R.Q., Maier D.C. et Russel W.E., 1980. Long-term drift of icebergs in Baffin Bay and the Labrador Sea. *Actes du Coll. Iceberg Dynamics*, St John's, Terre-Neuve, Canada. Dans : W.E. Russel, *Cold regions science and technology*, v. 1, n° 3 et 4, p. 183-193.
- Romanovsky V., 1969. *Les océans. P.U.F. (Presses Universitaires de France), Collection "Que-sais-je ?*, n° 92, 126 p..
- Savoye B., Voisset M., Cochonat P., Auffret G.A., Bourillet J.F., Droz L., Ollier G., Coutelle A., Le Cann C., Auzende J.M. et Robert S., 1988. "Le canyon du Var" : Case study of a modern active proximal channel, *Colloque A.A.P.G. (American Association of Petroleum Geologists)*, Nice, septembre 1988, (communication).
- Savoye B., Cochonat P. et Piper D.J.W., 1990. Seismic evidence for a complex slide near the wreck of the Titanic: model of an instability corridor for non-channeled gravity events. *Marine Geology*, v. 91, p. 281-298.
- Savoye B. et Piper D.J.W., 1991. The Messinian Event on the margin of the Mediterranean sea in the Nice area, southern France. *Marine Geology*, v. 97, sous-presse.

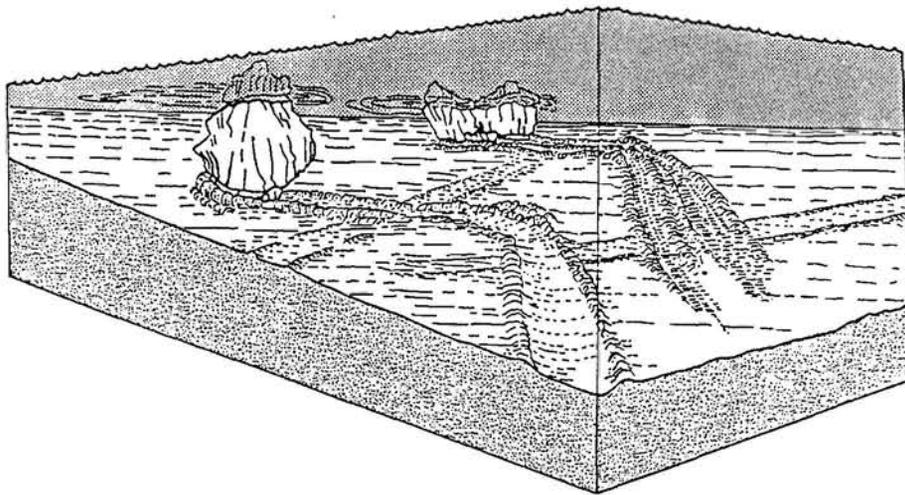


Figure 1 : Bloc-diagramme représentant le remaniement des sédiments du plateau et la formation de gouges sous l'action des icebergs. Noter le changement de la forme des gouges lorsque la dérive des icebergs se modifie et la possibilité de datation relative des sillons les uns par rapport aux autres.
D'après Reimnitz et Barnes, 1974.

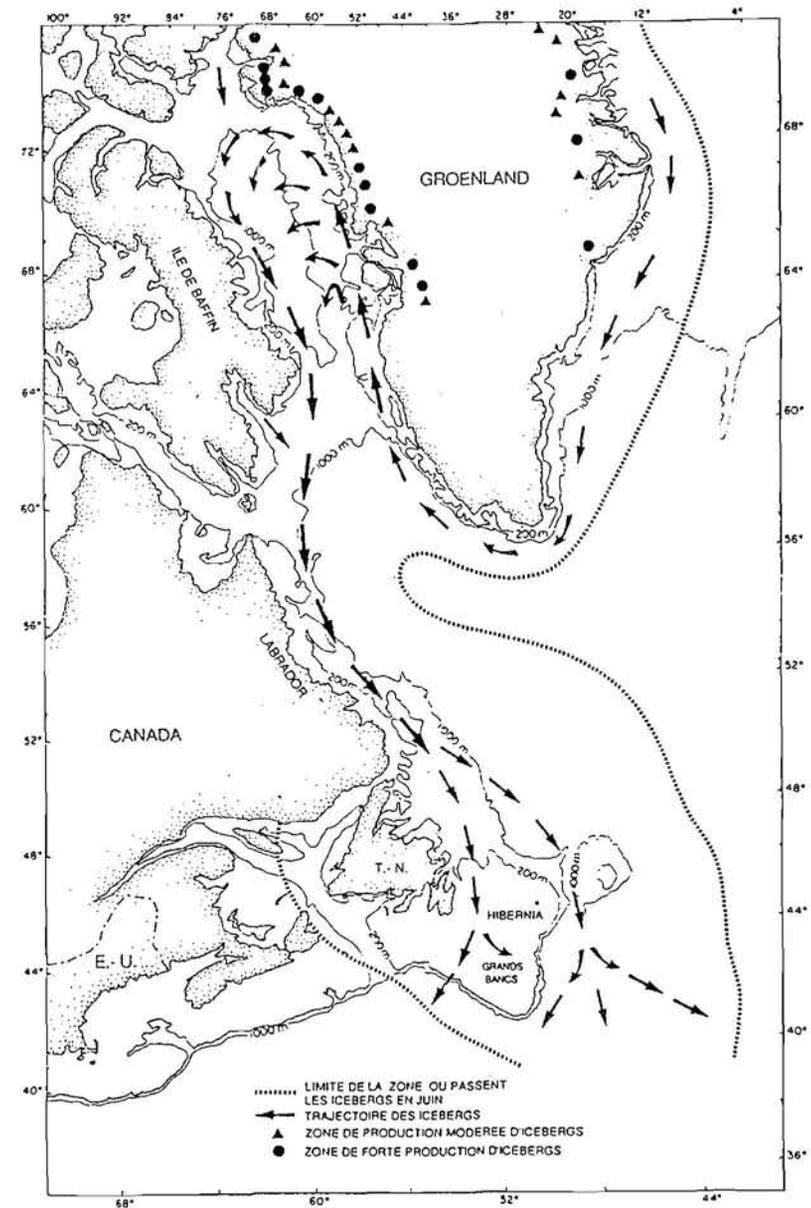


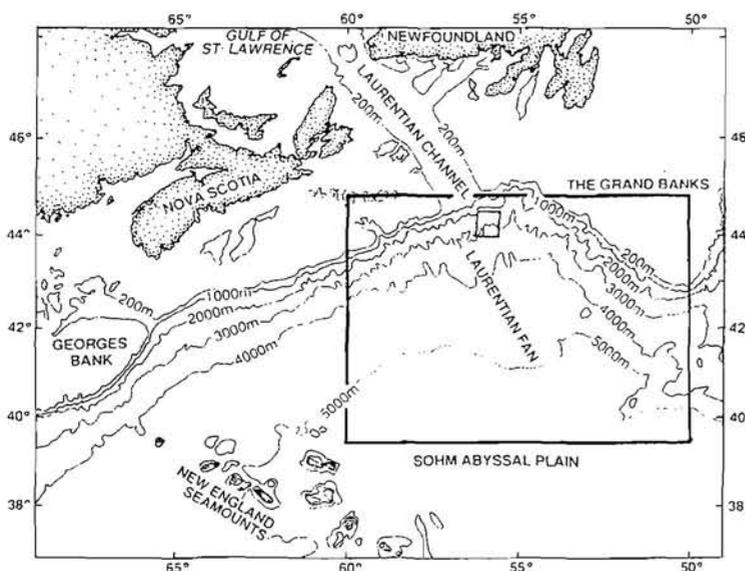
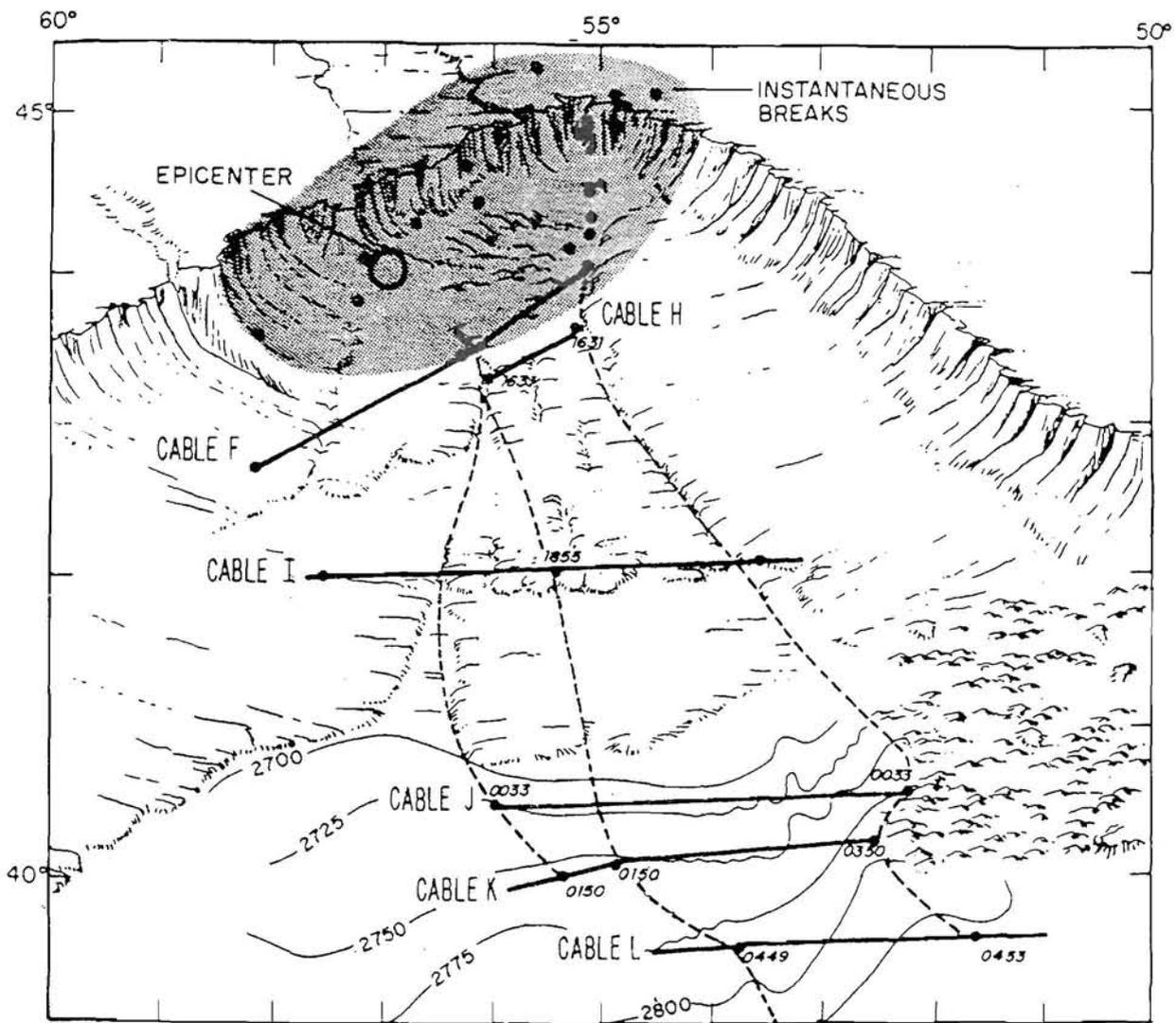
Figure 2 : Carte montrant les zones de production des icebergs et la dérive des icebergs jusqu'aux Grands Bancs de Terre-Neuve. Le champ pétrolier Hibernia est une zone potentielle d'échouage des icebergs.
D'après Robe, 1980.



Figure 3 : Reconstitution du paysage littoral de la ville de Valdez (Alaska) après le tremblement de terre de 1964. les installations représentées en pointillé ont été emportées en mer par le glissement engendré par le séisme.
D'après Coulter et Migliaccio, U.S. Geological Survey, 1969.



Figure 4 : Photographie aérienne de la ville de Valdez après le tsunami de 1964. Noter l'étendue de la frange littorale qui n'est pas enneigée et qui correspond à la zone inondée par le raz de marée.



Vue en perspective du mégaglisement de 1929 au large de la côte Est du Canada

○ séisme détonateur

— câbles téléphoniques rompus.

D'après Menard (1964)

Figure 5 : Vue en perspective du mégaglisement de 1929 au large de la côte Est du Canada.
D'après Menard, 1964.

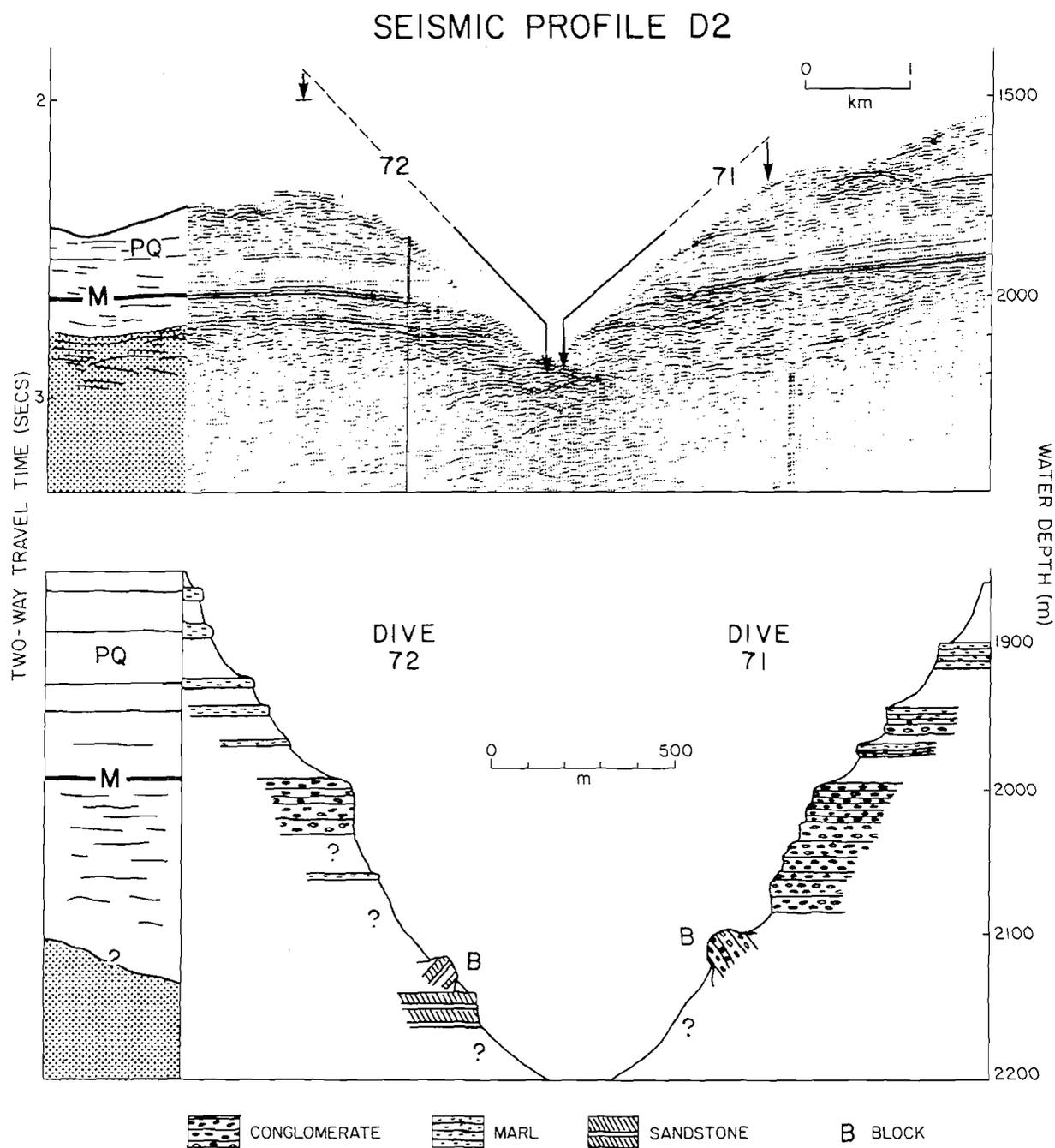


Figure 6 : Exemple de calibration d'une coupe sismique avec le submersible : plongée CYANA dans le cirque Marcel (Nice). Haut = profil sismique transversal à travers le cirque ; bas = coupe lithologique reconstituée à partir des observations submersible.
D'après Savoye et Piper, sous-presse.

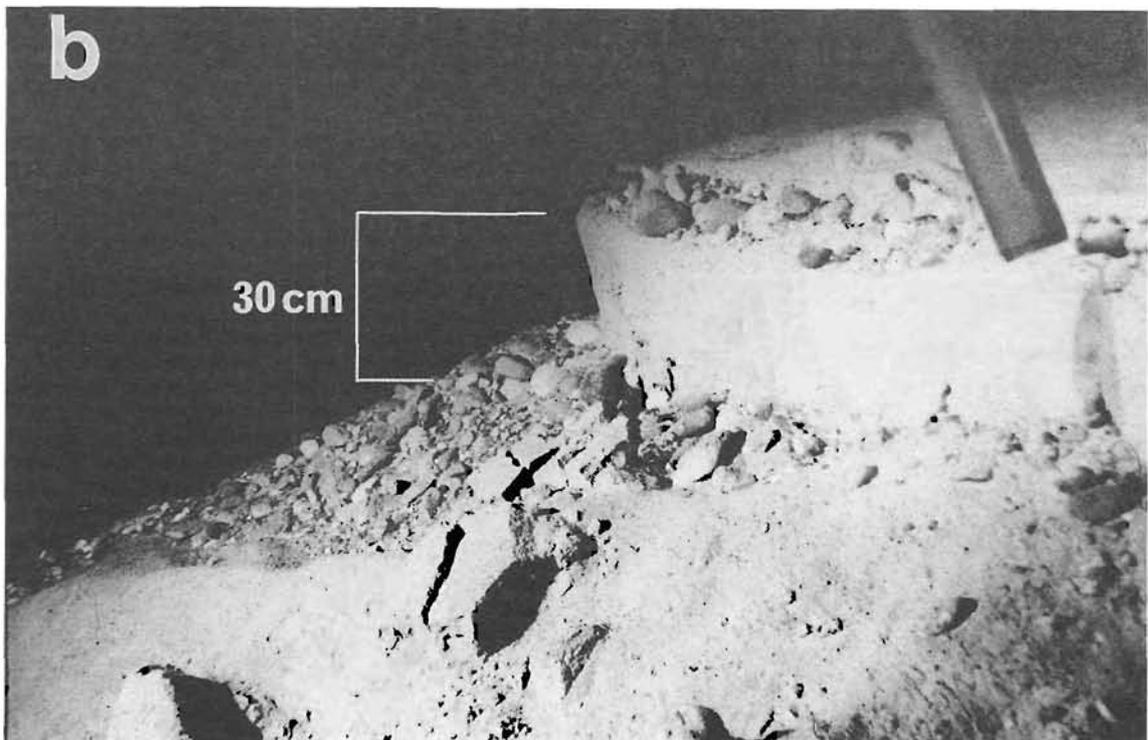
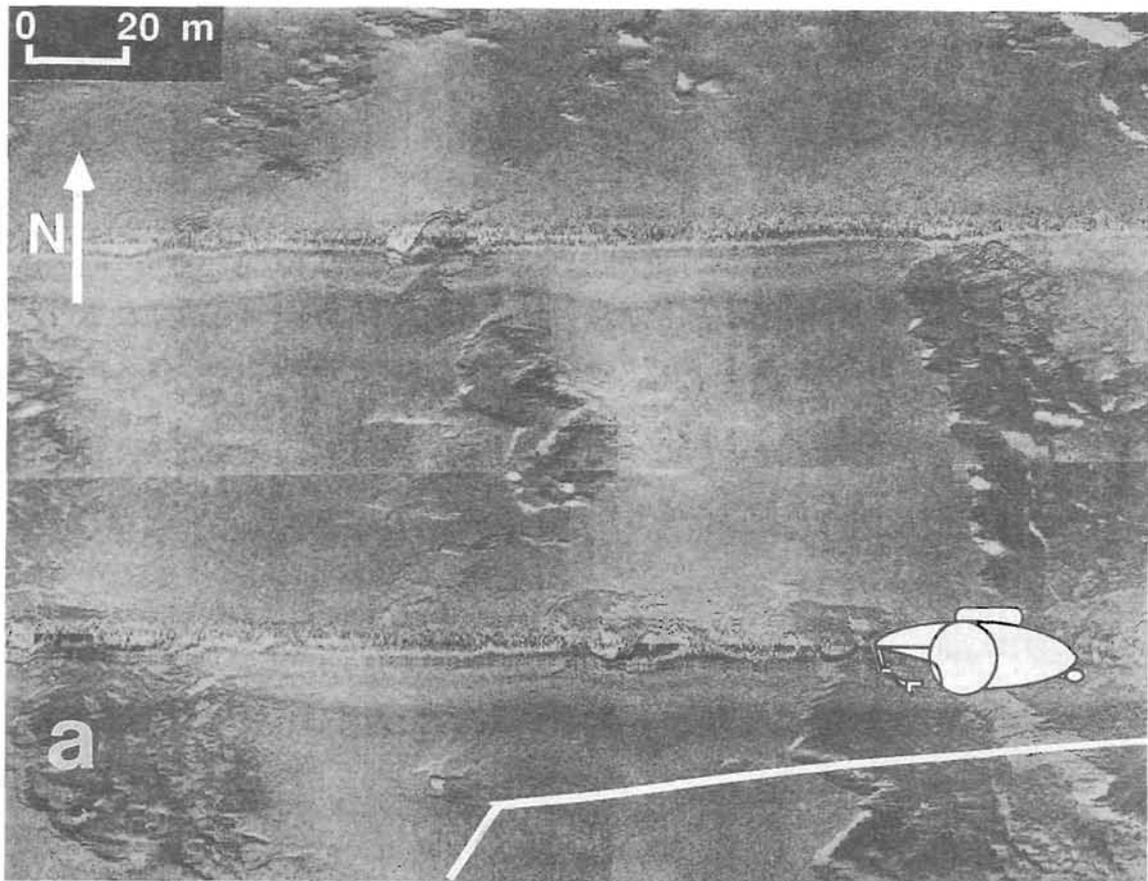


Figure 7 : Exemple de calibration d'une mosaïque sonar à partir du submersible : plongée CYANA dans la vallée sous-marine du Var.

7a = mosaïque d'images sonar, le trait rouge indique le trajet suivi avec le submersible, le figuré de la CYANA indique le lieu pris en photo ;

7b = photographie Cyana montrant le passage brutal par le biais d'une marche de hauteur métrique d'un fond vaso-silteux à l'arrière-plan (correspondant aux plages gris-clair sur l'image sonar) à un fond tapissé de galets (plages gris-foncé sur l'image sonar).

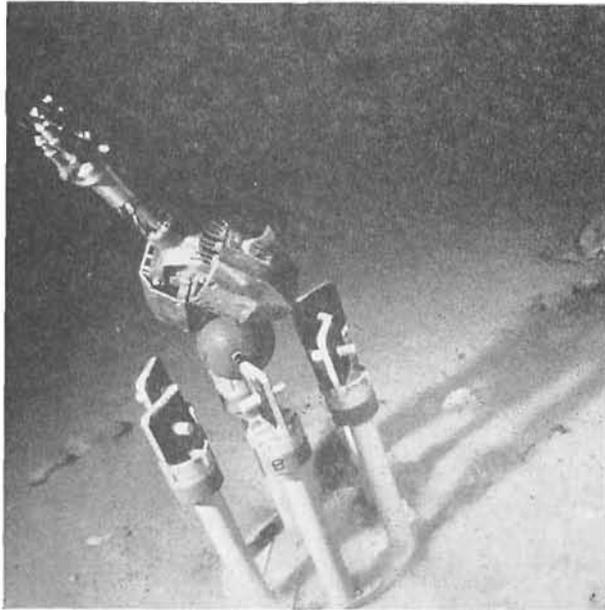


Figure 8 : Mise en oeuvre de petits carottiers à sédiments à l'aide du bras télémanipulateur de la CYANA. Cette image montre un système très simple permettant d'emporter 6 tubes-carottiers par plongée sur une sorte de chassis transporté par le bras télémanipulateur.

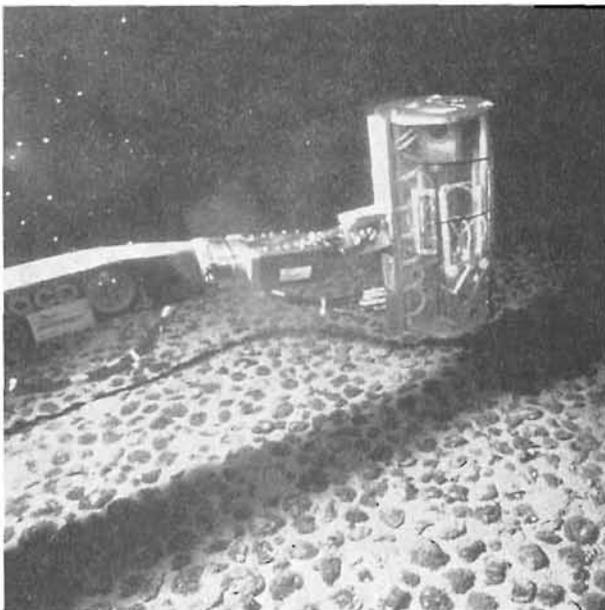
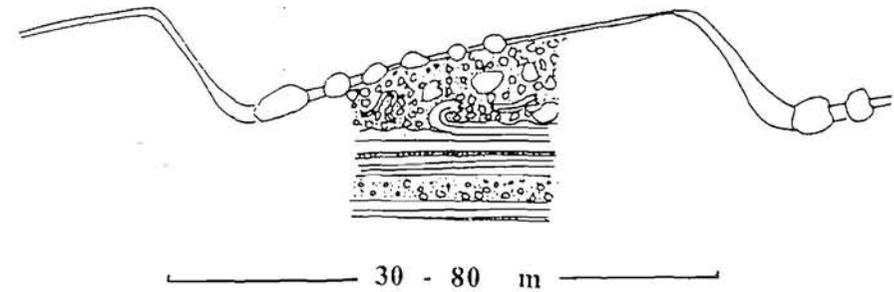
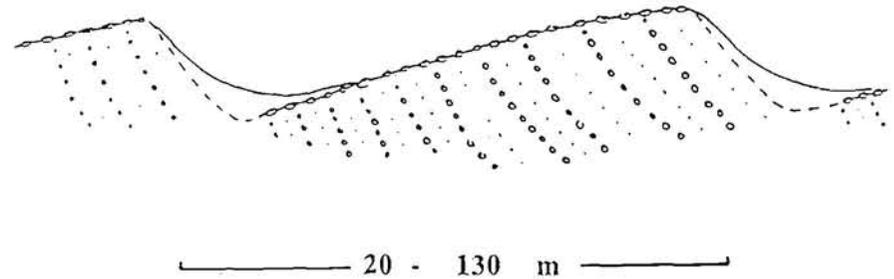


Figure 9 : Scissomètre mis en oeuvre à partir du Nautille avec l'aide de l'un des bras télémanipulateurs (mesure in-situ de la cohésion des sédiments dans un champ de nodules du Pacifique Nord-Est). Photographie aimablement fournie par P. Cochonnat.

Hughes Clarke et al. (1990, Fig. 10)



Baker (1973, Fig. 45)



Thiel (1932, Fig. 8)

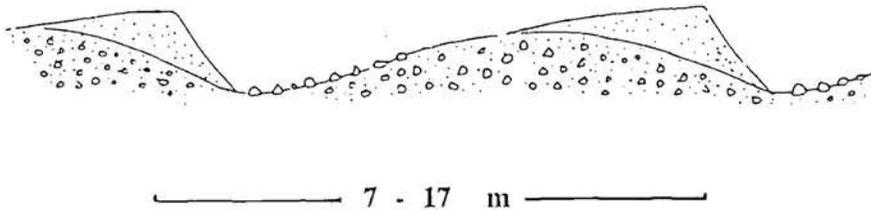


Figure 10 : Comparaison des principales observations effectuées de par le monde sur la structure interne des dunes de galets. Seul, le schéma du haut concerne des observations sous-marines en submersible. D'après Hughes-Clarke, 1990.

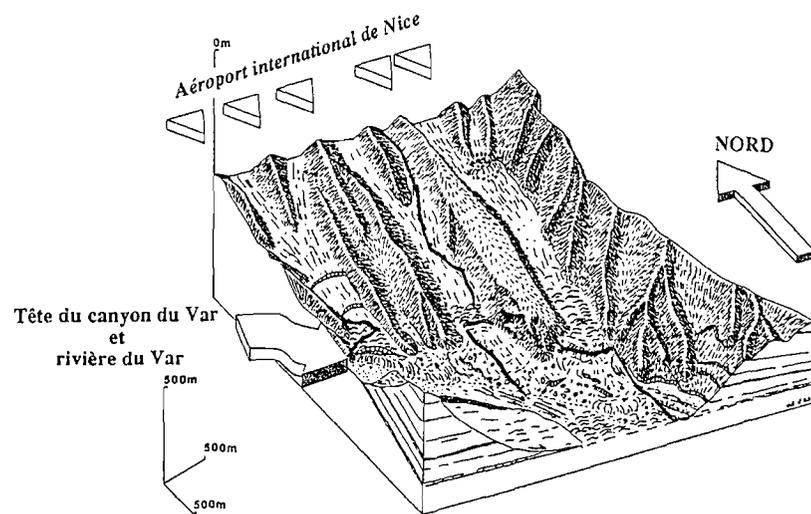


Figure 11 : Bloc-diagramme représentant le haut de pente de la Baie des Anges à l'aplomb de l'aéroport international de Nice, synthèse des données bathymétriques, sonar, carottes et submersible. Les traits gras représentent les trajets suivis avec la CYANA. Dessin réalisé par O. Parize et B. Savoye. D'après B. Savoye et al., 1988.

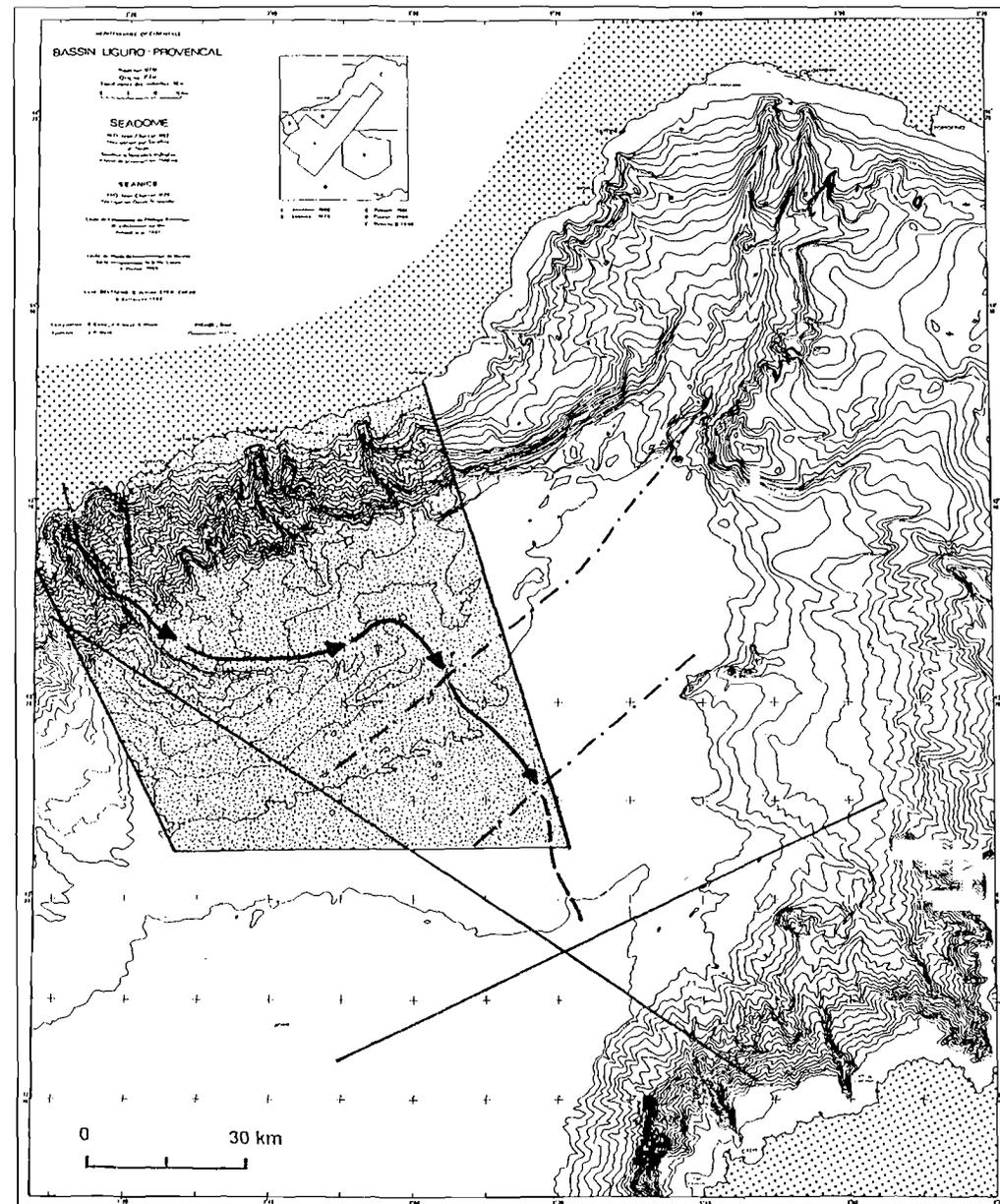


Figure 12 : Schéma montrant sur un fond bathymétrique (carte de la Mer Ligure avec la Corse dans le coin gauche en bas, la Provence et la riviéra italienne en haut (Mazé et al., 1987), le trajet suivi par l'avalanche sous-marine de 1979 (flèches), la position des câbles téléphoniques qui ont été sectionnés par celle-ci (traits pointillés), la position des câbles intacts (traits continus), ainsi que la zone d'étude IFREMER (trame).

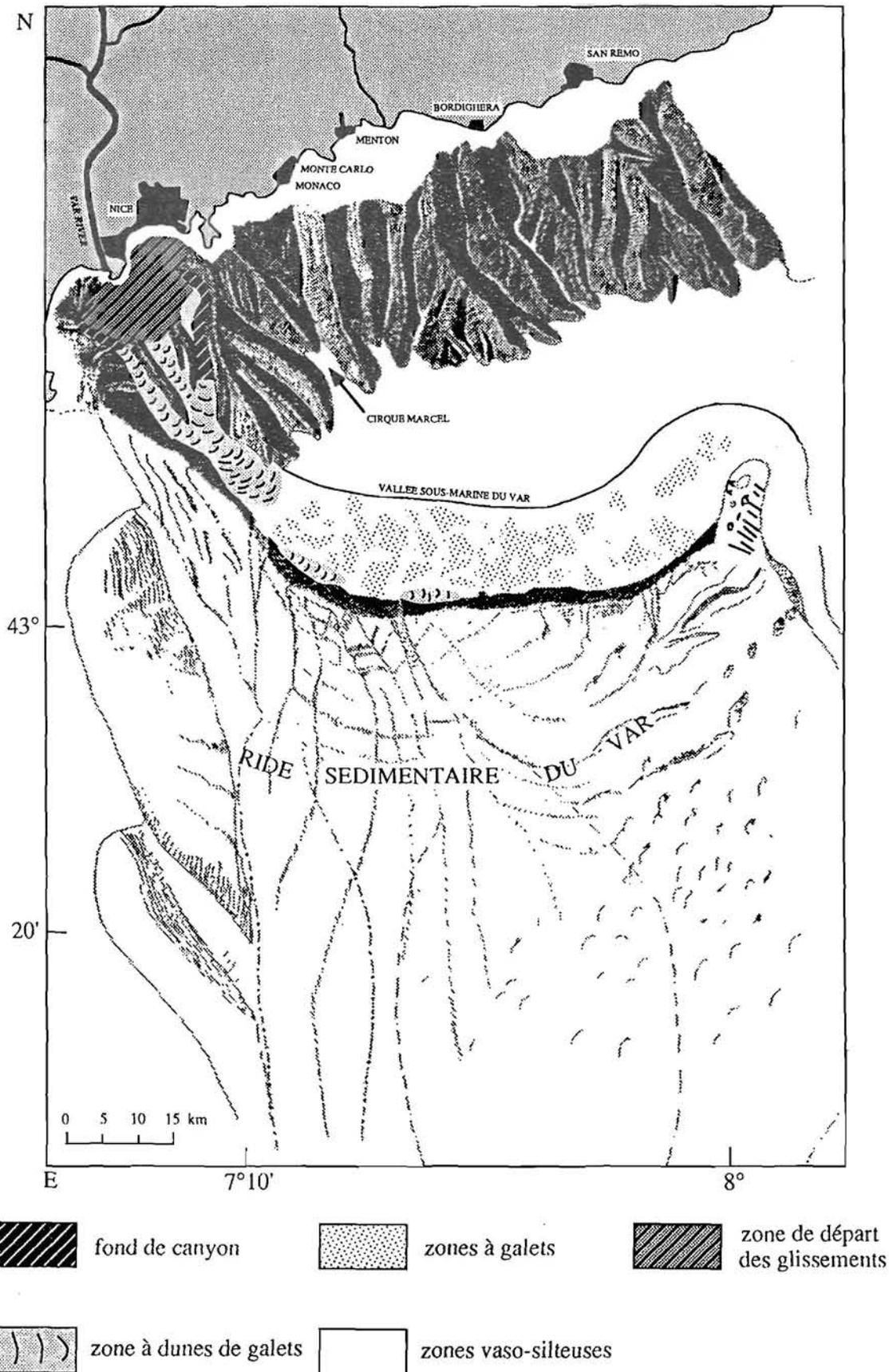
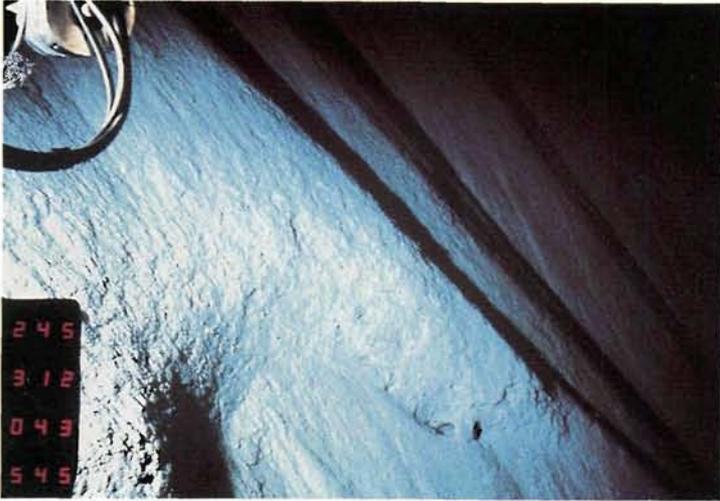


Figure 14 : Morphologie du système sédimentaire sous-marin du Var et figures sédimentaires associées aux évènements gravitaires. Noter les très nombreuses incisions qui entaillent la pente continentale et relient en quelques kilomètres la côte (plateau continental très faiblement développé) aux grands fonds. Noter aussi la forme en croissant de la ride sédimentaire qui borde au Sud la vallée sous-marine du Var.

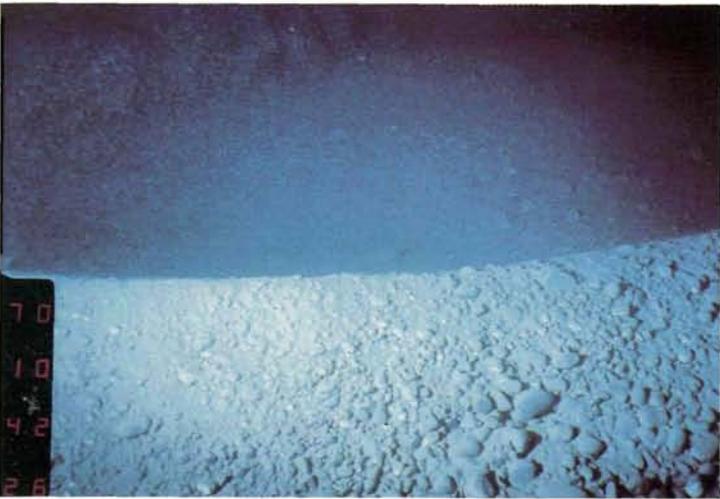
A



B



C



D



E



F

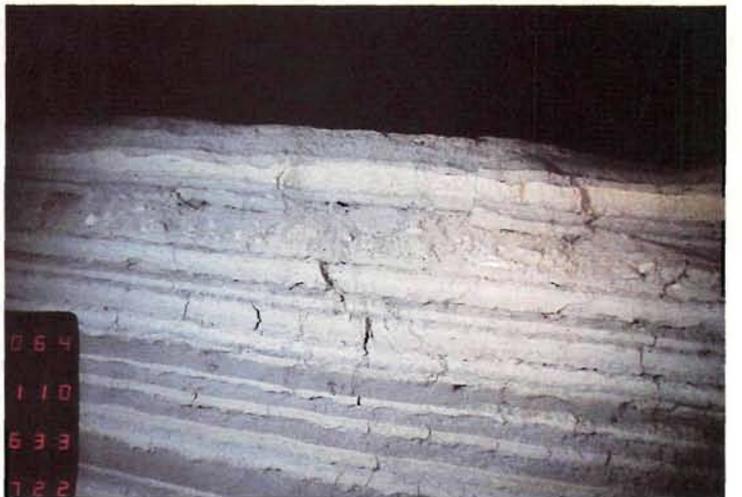


Figure 13 : Illustration à partir de photographies CYANA des trois phases principales constituant un événement gravitaire : 1) érosion-rupture [A et B], 2) transport [C et D], 3) dépôt [E et F].

A = niche d'arrachement de dimensions métriques sur un flanc de vase très penté (angle $> 45^\circ$) surplombant le cirque Marcel.

B = effondrement de blocs métriques de sédiments indurés, partie amont du canyon du Var.

C = crête d'une dune à galet (fond du canyon du Var)

D = figures d'affouillement et encorbellement à la base du flanc ouest du canyon du Var, qui témoignent du passage dans le canyon de courants de faible épaisseur et de haute énergie au pouvoir érosif important. Noter la présence de galets sur la paroi marneuse du canyon au dessus de l'encorbellement. Ces galets, transportés par les avalanches sous-marines, ont été plaqués sur le mur du canyon lors du passage de ces avalanches.

E et F = dépôts de turbidites classiques. Ces photos ont été prises dans la partie aval du système sédimentaire du Var par 2 400 m de profondeur d'eau.