



HAL
open science

RECHERCHES SUR LE PLATEAU CONTINENTAL DE BANYULS-SUR-MER (i)

Jacques Bourcart

► **To cite this version:**

Jacques Bourcart. RECHERCHES SUR LE PLATEAU CONTINENTAL DE BANYULS-SUR-MER (i). Vie et Milieu , 1955, 6 (4), pp.435-524. hal-02625963

HAL Id: hal-02625963

<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-02625963v1>

Submitted on 26 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

RECHERCHES SUR LE PLATEAU CONTINENTAL DE BANYULS-SUR-MER (1)

par Jacques BOURCART

INTRODUCTION

La définition classique de ce trait géographique capital qu'est le plateau continental, est : la plaine doucement inclinée, presque plate, qui prolonge les continents jusqu'à la profondeur de 100 brasses (habituellement traduite par 200 mètres). Cette définition provient du fait que cette limite est déduite de la lecture des cartes océanographiques où l'isobathe de 500 succède immédiatement à celle de 200. Nous verrons que ce n'est qu'une grossière approximation. Il vaut mieux se servir du fait que le plateau est toujours limité vers le large par une rupture de pente, ou mieux par une accentuation de la pente. Celle-ci correspond à la zone que les océanographes appellent le *talus continental*. Ce nom, inadéquat, a été introduit par une théorie explicative dont le succès a été très grand, celle de Sir John MURRAY, géologue du *Challenger*.

Il est aussi habituel de remarquer que l'étendue du plateau, ainsi défini, est très variable : il aurait, par exemple, 140 kilomètres de large sur la côte sibérienne de l'océan Arctique. Toute la mer du Nord et la Manche lui appartiennent. En revanche, au large de Nice, il n'y a pratiquement plus de plateau continental. En règle générale, la largeur du plateau est d'autant plus grande que le continent adjacent est plus plat. Il disparaît pratiquement, quand une chaîne plissée récente est parallèle au littoral (littoral pacifique) ou quand elle s'y termine subitement, comme c'est le cas par exemple pour la région des Pyrénées-Orientales et des Alpes-Maritimes.

(1) Communication présentée à la réunion de travail des laboratoires méditerranéens, en Novembre 1952.

Cette plaine sous-marine, si importante sur nos côtes atlantiques et sur celles des États-Unis, est le lieu essentiel de la pêche, aussi bien au chalut que celle des poissons migrateurs qui nagent entre deux eaux.

La végétation, dans les limites où peut encore pénétrer la lumière, la faune fixée au sol, y sont particulièrement abondantes. Le plateau est l'équivalent des basses plaines du continent, si riches en végétation et si peuplées. Il n'alimente pas seulement une population fixée ou celle qui la dévore, mais très largement aussi le plancton flottant, aliment lui-même, pour la plus grande partie, de la faune marine.

La navigation sous-marine a, depuis que les profondeurs de plongée augmentent, à se préoccuper des fonds du plateau continental. Il en est de même des multiples liaisons qui le traversent ou le traverseront : câbles télégraphiques, conduites diverses, etc... Enfin, ces toutes dernières années, sa géologie profonde a préoccupé les spécialistes. Grâce aux méthodes de prospection indirecte, géophysiques, on a pu se faire une idée de sa constitution géologique profonde. Les résultats obtenus ont été si inattendus qu'ils ont motivé la décision du Président des États-Unis, comme de quelques autres états, d'annexer à la Confédération tout le plateau qui la borde.

D'un point de vue plus théorique, le plateau continental n'est qu'une partie d'une zone beaucoup plus vaste de la Terre : celle essentiellement où, au cours des temps géologiques, les mers n'ont cessé d'aller et de venir. J'ai appelé cette zone la marge continentale. Les étagements de couches qui, comme les feuillets d'un livre, constituent la majeure partie des continents et même la couverture souvent épaisse de la plupart des chaînes de montagnes, se sont déposés sur le plateau continental. L'avance de la mer y était parfois si importante qu'il ne subsistait plus des continents que des îles ; inversement, les continents s'agrandissaient parfois de presque toute son étendue.

Vers le centre des continents, la limite de cette zone doit se rechercher au voisinage des grands boucliers (canadien, fennoscandien, sibérien, indien, saharien, brésilien, etc...), ou au bord de chaînes plissées anciennement comme l'Ardenne, qui ont tendance à émerger rythmiquement. Les chaînes récemment plissées comme les Alpes et les Pyrénées en font partie. Cette conception s'apparente à celle de FOURMARIER de la permanence des traits capitaux de la paléogéographie. Mais, pour nous, cette permanence n'existe que pendant la durée d'une ère (secondaire + tertiaire, par exemple) entre deux « révolutions », comme disait John JOLY. Dans le cours de cette ère, le domaine proprement océanique s'agrandit pourtant : l'Atlantique, ébauché au jurassique, n'existe vraiment que depuis le crétacé. Au contraire, le domaine méditerranéen, vraisemblablement océanique au début du secondaire, s'est progressivement restreint. Suivant cette manière de voir, la marge continentale correspond aussi peu à la *zone néritique* d'Emile HAUG qu'à des domaines qu'il aurait qualifiés de *bathyaux*. Ce dernier mot n'implique en fait aucune idée de profondeur,

mais une prédominance des sédiments fins, planctoniques, et une grande uniformité. La zone vocontienne, la zone dauphinoise, exemples classiques des sédiments bathyaux, comportent des séries sédimentaires essentiellement faites de ce que les océanographes appellent les « vases bleues péricontinentales ». À Nice, celles-ci montent à la hauteur du plongeur de la Plage de l'Opéra.

La presque totalité des dépôts marins qui constituent les séries géologiques que nous étudions en stratigraphie (géologie historique) se sont donc faits sur le plateau et sur son rebord (dépôts néritiques (1) et bathyaux) ou aux abords du plateau. Il semble que les sédiments vraiment océaniques sont extrêmement rares.

Malgré ces multiples intérêts et sa proximité et peut-être surtout à cause de celle-ci, le plateau continental a été plutôt délaissé par les océanographes. Ceux-ci étaient attirés, au cours du XIX^e siècle, par la recherche des plus grandes profondeurs, par une sorte de record dans leur chasse ou par la découverte de l'étrange faune des profondeurs. Les expéditions anglaises, américaines, françaises et allemandes, les croisières du Prince de Monaco n'ont touché le plateau qu'accidentellement.

Il n'en a pas été de même des hydrographes. Leur tâche officielle se limitait bien aux atterrages, mais leur curiosité n'a jamais été entièrement satisfaite par cette seule besogne et nous leur devons, particulièrement aux services français et anglais, plus tardivement à celui des États-Unis (Coast and Geodetic Survey), ce que nous savons de sa structure. Leur besogne ne s'est pas d'ailleurs cantonnée à de purs sondages. Les hydrographes français, par exemple, ont toujours recueilli au suif de leurs plombs de sonde, trace des sédiments qui s'y sont déposés. C'est grâce à ces renseignements, portés avec une exactitude inattendue sur les cartes marines, qu'un minéralogiste, DELESSE, dès 1871, put établir les cartes du plateau continental de la France et même de l'Europe qui n'ont vraiment pas encore été dépassées (2). La découverte, qui appartient encore au Service Hydrographique Français, de la mesure des profondeurs par l'écho sonore (ingénieur hydrographe MARTI), méthode actuellement universellement adoptée, permet à tous les bâtiments de guerre, de commerce ou de pêche de coopérer maintenant à cette exploration qui se révèle fertile en surprises. Aujourd'hui où, malheureusement, l'activité de l'Institut océanographique est extrêmement réduite, il est ainsi possible aux petites unités de la Marine Nationale, toutes munies d'un sondeur à ultra-son, de participer sans grands frais à cette étude.

(1) Mot d'Emile HAUG *νεριτη* : coquille.

(2) Les cartes bathylithologiques de THOULET, celles de l'Atlas de France (L. DANGEARD) ont ajouté divers détails sans altérer l'image générale donnée par DELESSE.

Mais les dépôts meubles du plateau reposent sur un fond de roches inconnues. Les géologues ont parfois étendu leurs tracés aux océans pour des motifs tout théoriques.

A la fin du siècle dernier pourtant, un bâtiment d'exploration a donné le départ aux études directes du fond rocheux. C'est sur l'initiative et sous le commandement du Commandant CHARCOT que le trois-mâts *Pourquoi-Pas?* a inauguré les études de géologie sous-marine, en Manche, dans le golfe de Gascogne et en Méditerranée. L'attrait de CHARCOT pour les terres arctiques, le manque de moyens, ont seuls restreint cette activité (1).

Le service scientifique et technique des Pêches Maritimes, créé au début du siècle sur l'initiative de Louis JOUBIN, se devait de chercher à mieux connaître cette partie importante de son domaine. Ses différents bâtiments, et surtout le *Président Théodore Tissier*, ont plusieurs fois tenté de le faire. Là aussi, malheureusement, l'ampleur de la tâche, le manque de moyens, ont beaucoup réduit sa contribution.

Faut-il aussi le dire? Il manquait en France des techniciens spécialisés : les expéditions océanographiques ont toujours compris des physiciens et surtout des biologistes, mais il n'est que très récemment que le *Météor* ou le *Willebrod Snellius* ont embarqué des spécialistes de la sédimentation ou des géologues. Dans l'ensemble de l'organisation du Prince de Monaco, aucune place n'était réservée à ces études confiées au seul THOULET, curieusement installé à Nancy. Bien qu'il soit mort presque centenaire, THOULET n'a pu faire aucun élève. En France, seul Louis DANGEARD, géologue du *Pourquoi-Pas?* s'était voué à la géologie marine, à la géologie d'ailleurs plutôt qu'à la sédimentation. Les devoirs universitaires ne lui ont pas non plus permis de réaliser pleinement son vœu.

La guerre a montré tout l'intérêt de telles recherches : l'état-major de la *Kriegsmarine* a fait appel et mobilisé tous les spécialistes du *Meteor* et ceux qui s'occupaient des côtes plutôt vaseuses de la Baltique et de la mer du Nord dans de multiples stations maritimes. Ceux-ci ont dressé, pour l'ensemble des mers des théâtres d'opérations, des cartes de géologie maritime qui, vu l'urgence du travail, ne sont souvent que des compilations, mais fort intelligentes (2). L'État-Major naval britannique, dès Dunkerque, puis l'État-Major combiné allié, ont entrepris, avec un très grand luxe de moyens, l'étude océanographique des zones proches du littoral

(1) Elle a donné lieu notamment à la belle thèse de Louis DANGEARD et aux notes ultérieures de cet auteur, de Léo BERTHOIS et de Jean FURNESTIN, actuellement groupés avec quelques autres amis dans le C.R.E.O.

(2) La carte des sédiments n'est autre chose qu'une synthèse des indications portées sur les cartes françaises et anglaises. Par contre, un certain nombre de feuillets classifient les sols sous-marins suivant leur « dureté ».

où pouvaient se faire un débarquement. Dans la faible mesure de leurs forces, les techniciens français de la « France Combattante » y ont coopéré sur place.

La victoire venue, le travail n'a pas été arrêté : les amirautés britanniques et américaines le poursuivent. En France, sous l'initiative de M. JACQUINOT, alors Ministre de la Marine, un « Comité d'Océanographie et d'Étude des Côtes » a été créé, groupant tous ceux qui s'intéressent ou ont besoin de l'Océanographie. Dès le début de la vie de ce Comité, une part importante de son travail devait être consacré au plateau continental.

C'est dans ces conditions que la petite équipe de mon laboratoire, spécialisée dans l'étude des littoraux, a abordé celle du plateau continental. J'y ai pour ma part participé par des croisières sur le *Président Théodore Tissier* (alors armé par la Marine Nationale) et sur plusieurs escorteurs, dragueurs et chasseurs et surtout sur l'avisos de recherches sous-marines *Ingénieur Élie Monnier*, en Manche, sur le plateau du golfe de Gascogne, en Méditerranée et au Maroc.

Ce travail est le résultat pour ce qui est des sédiments de ces trop brèves croisières, limitées dans le temps, non par l'État-Major dont la libéralité a été très grande, mais par la nécessité d'étudier les matériaux dans un très petit laboratoire où les moyens et le personnel sont extrêmement limités, par l'obligation d'imaginer des techniques nouvelles et les multiples échecs auxquels on est alors exposé, par le manque aussi de jeunes collaborateurs.

On ne trouvera donc, dans ce travail, à aucun degré une description raisonnée du plateau continental français, mais bien plutôt une série d'exemples, destinés à servir de base à cette exploration indispensable. Ceux-ci permettront, j'espère, d'améliorer les méthodes d'étude et surtout l'outillage tout à fait déficient dont nous disposons.

Pour ce qui est des sédiments, je me suis enfin efforcé d'en donner une classification simple et utilitaire, permettant à tout bâtiment de coopérer à cette œuvre.

CLASSIFICATION DES SÉDIMENTS

Cette classification, à l'origine, a une base purement dimensionnelle (granulométrique); les classes de sédiments sont comprises entre des limites de dimensions qui correspondent à celles qui, depuis tout temps sont admises par le sens commun. Elles reçoivent donc des noms qui appartiennent au français courant et non à un langage artificiel. En outre, la dimension moyenne de chaque classe correspond à un maximum de fréquence dans les matériaux naturels, les limites à une grande rareté, dans cette dimension. Il est, par exemple, très difficile de trouver des

granules de 3 ou 4 mm, des grains de sable de 0,2 mm. En outre, la nature même des matériaux change dans chaque classe : les galets ou graviers sont faits de n'importe quelle roche, les grains de *sable*, à l'exception des débris de coquilles sont, en très grande majorité faits de quartz. Ils ont une dimension maxima qui correspond à celle qui est la plus fréquente dans les granites : 2 mm à 3 mm, ou, pour les éléments calcaires provenant surtout des coquilles, à l'intervalle entre deux perforations rapprochées par les éponges du genre *Cliona*. Les *poudres* sont formées de tout autres matériaux que les sables : calcaire dû à la pulvérisation des coquilles profondément corrodées par les algues ou champignons perforants (1), ou par des micro-organismes planctoniques, micas ou autres « phyllites » transportés en flottaison vers la mer par les cours d'eau. Enfin, dans chaque classe prédomine un *faisceau* de propriétés physiques, les autres étant pratiquement négligeables : la pesanteur pour les galets ou graviers, la capillarité pour les sables, les « propriétés de surface » dès les poudres. On peut donc, en généralisant une dénomination utilisée en physique, remplacer le nom de classes par celui de *phases*, fractions considérées comme homogènes et de propriétés constantes à l'échelle de l'observation.

I. — *Cailloux ou ballast : du mètre à 2 mm*

Subdivisions : Blocs 500 mm ;
Galets de 500 à 25 mm ;
Graviers (ou gravillons) de 25 à 10 mm ;
Granules de 5 à 2 mm.

1. Masse individuelle importante par rapport à la masse moyenne des éléments formant les aspérités des pentes.
2. Adhésion impossible entre les éléments, soit à sec, soit par l'intermédiaire de l'eau hygroscopique.
3. Transport par les courants d'eau ou d'air en général, par roulage sur le sol, sans formation de dunes ou de rides mobiles. Le transport en suspension est possible dans les régimes à grande turbulence (rivières torrentielles) ou dans les écoulements boueux.
4. Percolation des eaux à travers la masse, possible en régime turbulent ; transmission presque instantanée des pressions dans la masse des eaux percolées ; pertes de charge relativement faibles ; percolation possible des boues « visqueuses » et des ensembles visqueux sous la seule gravité.

(1) Ceux qu'a décrit dans un très beau mémoire l'abbé FRÉMY, *Ann. Inst. Océanogr.* XXIII, fasc. 2, 1945.

II. — *Sables : de 2 mm à 0,02 mm*

Subdivisions : a) Sables grossiers de 2 à 1 mm;
 moyens de 1 à 0,5 mm;
 fins de 0,5 à 0,1 mm;

b) « Sablon » ou sables très fins de 0,1 à 0,02 mm.

1. Masse individuelle faible par rapport à la masse moyenne des aspérités des pentes (donc arrêt facile des éboulis).
2. Adhésion à sec nulle, mais possible par l'eau hygroscopique.
3. Transport par les courants d'eau ou d'air par roulage. Entre certaines limites de vitesse : formation de dunes et de rides mobiles. Transport en suspension dans les régimes à turbulence moyenne (régime fluvial).
4. Percolation des eaux, à la différence de la phase suivante, par la seule gravité, mais circulation très généralement en régime tranquille. Pertes de charge notables; transmission progressive des pressions. Percolation des ensembles visqueux possible avec de fortes charges. Affirmation des phénomènes capillaires.
5. Adsorption déjà considérable. Force électromotrice de filtration mesurable.
6. Indice de plasticité (Atterberg) nul ou très faible.

III. — *Poudres : de 0,02 à 0,001 mm*

1. Adhésion à sec notable, importante par l'eau hygroscopique : formation de boues rigides, thixotropiques.
2. Transport par les courants en suspension même avec de faibles turbulences (régime d'étiage des rivières tranquilles). Pas de formation de dunes ou de rides mobiles.
3. Percolation des eaux par « quanta d'imprégnation » (B.-A. KEEN). Circulation dans les capillaires sous de fortes différences de pression, avec souvent effet Jamin. Mouvements browniens très forts; l'effet de la pression ne détermine pas de « consolidation » appréciable, sauf dans le cas prévu au paragraphe suivant.
4. Fréquence d'association avec des liants à grains plus fins en formant des *ensembles* à structure cellulaire, très rigides (vases, limons), imperméables, se tassant jusqu'à expulsion de l'eau incluse dans les mailles. Aucun retour par élasticité en cas de décharge. Au-delà d'une certaine limite, l'excès de pression entraîne la désintégration de l'ensemble.
5. Pouvoir adsorbant déjà grand vis-à-vis des molécules et des ions.
6. Coagulation possible par les électrolytes, sans formation d'hydrogels (sauf pour les phyllites argileuses).
7. Indice de plasticité (Atterberg) grand.

IV. — *Précolloïdes ou suspensoïdes* : < 0,001 mm

1. Éléments formés de minéraux variés, souvent minéraux des argiles.
2. Adhésion à sec et par l'eau hygroscopique; suspensions rigides pour de faibles concentrations (2 %). Thixotropie dans certains cas particuliers (mousses).
3. Transport en suspension, même sous l'effet des courants de convection.
4. Imperméabilité à l'eau de pluie (pH 5 à 6), mais microperméabilité virtuelle se développant sous l'effet d'un accroissement de pression (ZUNKER).
5. Lapidification sous l'effet d'un excès de pression.
6. Facilités de formation de flocons ou d'agrégats (mouvements browniens).
7. Pouvoir adsorbant grand vis-à-vis des ions.
8. Coagulation par les électrolytes, avec formation constante d'hydrogels; gonflement ou retrait.

V. — *Colloïdes* : < 0,0001 mm

Mais les sédiments naturels ne sont pas purs, ce sont des mélanges des différentes phases dont on n'isole qu'artificiellement les phases constituantes. Certains de ces mélanges sont si communs dans la nature qu'ils ont depuis longtemps reçu des noms courants : les *limons* d'inondation des cours d'eau : mélange, de couleur jaune, brune ou rouge, de sable, de sablon et de poudre avec un *liant* colloïdal d'oxyde de fer; les *vases*, grises, noires, brunes, des estuaires, des ports et des baies fermées; les *boues*, blanches, rouges, vertes, etc... des fonds océaniques. Ces « ensembles » ont, en principe, les propriétés de la phase la plus fine du mélange, pourvu que celle-ci y existe en quantité suffisante pour masquer celles de la phase grossière : par exemple le béton et le mortier ont les propriétés du ciment colloïdal (plasticité, rigidité ou viscosité).

Prenons par exemple la vase. Celle-ci est formée, si on la dissocie, (et alors elle ne peut plus se reformer) d'un *squelette* : graviers ou granules et grains de sable ou de sablon avec un *liant* d'humus, de sulfure de fer et d'eau. C'est ce liant qui lui confère ses propriétés essentielles qui sont aussi celles des boues :

- 1° Sa *continuité* et sa très faible perméabilité;
- 2° Sa *rigidité*, propriété essentielle des solides, mesurable en dynes/cm², avec un rigidimètre;
- 3° Sa *plasticité*, c'est-à-dire, pour une quantité d'eau suffisante, la possibilité de se déformer sans rupture sous l'action d'une contrainte ou de s'écouler par un orifice, mais avec absorption d'une certaine quantité d'énergie; un excès d'eau (au-delà de la limite de liquidité) fait passer la vase plastique à un *liquide visqueux* s'écoulant sous son propre poids;

4° Sa *thixotropie*, c'est-à-dire la propriété, existant par exemple dans les peintures et vernis, de passer sous l'effet de chocs ou de vibrations, de l'état solide à l'état liquide et après un certain temps de repos (temps de prise) de repasser à l'état solide. Pour bien des raisons, on peut donc comparer les vases et boues aux gels et leur supposer au repos une structure hexaédrique que les chocs ou vibrations détruisent. Les particules alors libérées, reviendraient à leur place dans le champ d'attraction des plus grosses, sous l'effet des mouvements browniens. On peut donc considérer qu'elles ont, comme des molécules, une chance déterminée d'atteindre le champ d'attraction d'une autre particule. Cette chance dépend à la fois de la concentration et de l'activité brownienne. Nous reviendrons plus loin sur la nature des liens qui permettent cette cohésion. Mais il existe une limite inférieure à la thixotropie quand l'énergie brownienne dépasse la cohésion (1).

On peut, comme dans le cas du béton ou du mortier, modifier le dosage du liant par rapport au squelette (« agrégat » du génie civil) sans altérer fondamentalement les propriétés d'un ensemble : par exemple, on peut augmenter la quantité de sable dans un ensemble, ou l'on peut trouver des ensembles naturels contenant plus ou moins de ce matériau.

Nous dirons alors que nous avons affaire à une vase *sableuse, graveleuse* (maigre); mais, même à l'œil nu, l'ensemble reste encore une vase : le sable ne s'en sépare que par dissociation dans l'eau, en fournissant une certaine énergie (analyse mécanique). Mais pour une plus grande quantité de sable introduite dans le mélange, les propriétés de la vase disparaissent brusquement et celles des formations granulaires apparaissent, absence de rigidité vraie, mais cohésion dans l'air à l'état mouillé sous l'effet de la capillarité beaucoup plus forte, absence d'adhésion à sec. On parlera alors de *sable* ou de *gravier vaseux* où chaque grain est enduit d'une coque de liant. Ce saut des propriétés est relativement *très brusque*, comme le passage, par augmentation de la quantité de l'eau, de l'état plastique à l'état liquide au-delà de la limite de liquidité.

Nous grouperons donc les sédiments en *sédiments granulaires*, mobiles dans l'eau ou dans l'air, cohérents, pour les sables, seulement en présence d'air, quand ils sont séparés par un réseau d'eau de dimension capillaire (pâté de sable des enfants) et les *sédiments continus et rigides* : vases et boues.

Nous avons montré, Claude FRANCIS-BŒUF et moi, que la sédimentation des flocons ou de l'écume, origine première de la vase, se faisait par *gravité* dans les eaux calmes, sans turbulence, ou par *attraction capillaire* et collage, sous une tranche d'eau à peu près nulle, accessoirement les objets flottés : micas, feuilles d'arbres ou débris de plantes, duvets, animaux ou végétaux flottant dans la couche d'eau superficielle,

(1) Expérience de Buzàgh.

que les océanographes appellent plancton, se déposent avec les flocons et écumes. Ceux-ci ont déjà la constitution de la vase : sablon de quartz, poudre calcaire de micas ou de phyllites, particules argileuses, frustules de Diatomées, spicules d'Éponges, débris d'algues et eau, et pour l'écume : air inclus. Ce mélange est, pour sa phase solide, un ensemble cohérent et rigide, c'est-à-dire que les grains sont soudés entre eux par une attraction (newtonienne ou forces de van der Waals?). L'écume, dans son ensemble, possède une limite de résistance à la rupture par déformation comme un solide : elle peut soutenir une soucoupe, être dressée à la côte et sécher en restant cohérente avec un aspect d'éponge, etc... En revanche, conservée dans un bocal, elle tombe en eau si l'on souffle simplement dans un tube, c'est-à-dire en introduisant dans l'ensemble une certaine proportion du CO^2 de la respiration, qui modifie son pH. On peut appliquer à ces ensembles grossiers l'explication que l'on donne pour la transformation d'un « sol » colloïdal stable (ici une suspension où les grains ne peuvent être maintenu que par la turbulence), en un « gel » cohérent à propriétés de solide. Pour que les « micelles » du « sol » restent libres (dispersées), il faut qu'elles se repoussent et soient superficiellement chargées d'une quantité d'électricité suffisante.

Si la charge des particules devient nulle ou au moins inférieure aux forces d'attraction, et qu'elles sont fortuitement portées dans le champ d'attraction d'une autre particule, elles se soudent alors rigidement l'une à l'autre. On peut donc admettre que des flocons (ou de l'écume, en cas de phase gazeuse) se produisent quand la somme des charges des différentes particules est nulle. Il est aisé de montrer que si, initialement, la charge des diverses particules est de signe différent, elles peuvent s'attirer électriquement. Mais lorsque le contact a été établi entre deux particules chargées d'électricité opposée, les charges s'égalisent en valeur et en signe, il ne peut plus y avoir que répulsion. Une adhésion définitive n'est donc possible que s'il y a équilibre (total algébrique nul des charges). Il est bien entendu que, dans un milieu chargé d'ions comme l'eau de mer, ceux-ci concourent aussi à la stabilité de l'ensemble. Quelle est maintenant l'origine de cette charge superficielle des particules? Il semble qu'elle est due aux *frottements* de l'eau mue par tous les courants sur la surface des particules. Cette charge se conserve, dans la mesure où les chocs probables entre les ions libres dans le liquide ne l'enlèvent pas totalement avant qu'elle se reconstitue. L'image que nous donnons est celle de la charge maxima d'une machine électrique tournant dans une atmosphère ionisée ou contenant des poussières.

Pour démolir un ensemble rigide, pour remettre en suspension de la vase, il faut lui fournir une quantité d'énergie suffisante pour rompre les liens entre les particules constituantes, probablement en les chargeant par chocs, vibrations, etc... Ainsi subsistent, quand on lève les écluses de chasse, les vases des ports. Elles résistent à des courants qui entraîneraient facilement du sable ou même du gravier (exemples des ports

comblés de Honfleur, de Rochefort). Ces propriétés d'ensemble expliquent ainsi l'épaisseur considérable de la vase et de la tangué (sédiment à dominante calcaire de la baie du Mont Saint-Michel, des Veys ou de Goulven en Finistère), des plages, quand celle du sable, mobile sous l'eau, est toujours très réduite.

On peut distinguer en océanographie trois catégories de liants qui peuvent adhérer aux grains de quartz chargés d'électricité positive : la *poudre calcaire* (parfois colloïdale), les *oxydes* et *hydroxydes de fer* et la *glauconie* (silicate ferropotassique), enfin les particules argileuses. Au contraire, l'*humus* (matière noire des sols cultivables) lie entre eux les grains électronégatifs de calcaire.

Ces liants sont toujours *colloïdaux* ou presque colloïdaux (*précolloïdes*). Ils présentent deux propriétés essentielles :

1° Celle d'adsorber les ions et les particules gazeuses de signe électrostatique opposé. Ces ions peuvent être alors utilisés par les animaux ou les plantes; on peut donc parler, dans le cas des sédiments marins, comme le font les agronomes pour les sols cultivables de *complexe adsorbant*;

2° Une grande partie de ce complexe adsorbant peut changer de nature si les gaz du milieu ambiant changent : s'il devient par exemple *oxydant* ou *réducteur*. Les limons oxydés (jaunes ou rouges) deviennent des vases sous l'effet d'un excès d' H^2S , les vases réduites ou réductrices s'oxydent en devenant brunes ou rouges.

Le calcaire pulvérulent *insoluble* : CO^3Ca (1) se transforme en bicarbonate soluble $(CO^3H)^2Ca$, quand le milieu ambiant contient un excès de CO^2 ; les hydroxydes de fer passent à des sulfures en présence d' H^2S , à de la glauconie en présence d'une solution de silicate potassique dans le milieu ou d'ions SiO^3 et K . On peut donc appeler ce liant, instable par rapport aux éléments stables du squelette, *complexe évoluant* (BRAJNIKOV). On peut aussi mesurer le pouvoir qu'il a d'adsorber (de consommer) de l'oxygène ou d'en fournir (respiration de la vase de Cl. FRANCIS-BŒUF). Ces transformations se faisant dans les sédiments naturels surtout sous l'effet de bactéries, on peut, en suivant ce dernier auteur, qualifier au moins en partie, le liant de *complexe vivant*.

En règle générale, à l'exception des mers fermées, où l'oxygène n'est pas renouvelé (mer Noire, fosses intérieures des Indes Néerlandaises, dépressions aveugles des fjords de Norvège), la surface des sédiments rigides, vases et boues, est brune, oxydée et même émettrice d'oxygène, très riche en bactéries et en organismes microscopiques variés, c'est la *pellicule biogène* de VERNADSKY, élément fertilisateur des sols sous-marins : bactéries fixatrices de l'azote, nitrifiantes, ferro et sulfobactéries. L'importance de cette pellicule est particulièrement grande dans les

(1) Rapidement attaqué par les acides faibles.

profondeurs où peut pénétrer la lumière, par suite de la pullulation des Diatomées, algues microscopiques absorbant le CO² le jour et rendant de l'oxygène (assimilation dite chlorophyllienne).

Les Diatomées (ou autres algues à pigment) sont les plus importants créateurs de vie : aliment de toute la microfaune et par suite de toute la macrofaune. Mais la pellicule biogène ne manque pas même à la surface des grands fonds, où elle contient des bactéries autotrophes; elle y joue le même rôle et, oxydée ou oxydante, présente les mêmes contrastes avec la zone intérieure plus noire et réductrice de sédiment. Au contraire, à l'exception des bactéries (bactéries sulfurantes, bactéries de la décomposition de la cellulose ou des albumines) et de quelques Nématodes, ou d'organismes en état de latence, la vie est absente de la masse noire de la vase.

Si la sédimentation, particulièrement celle de la matière organique, est très importante, l'eau très trouble, la pellicule biogène se forme très difficilement. Il en est de même si, en dehors de la zone de pénétration de la lumière, les courants marins n'amènent pas une quantité suffisante d'oxygène pour oxyder la surface du sédiment. De cette quantité d'oxygène dépend la nature de la flore bactérienne. Il existe donc une grande variété dans la *fertilité* des fonds. Celle-ci dépend, en outre, de la présence ou de la quantité relative des *oligoéléments* (Fe, Mn, Cu, etc...).

L'épaisseur de la pellicule oxydée et oxydante dépend de la perméabilité du sédiment : épaisse dans les sables et dans les sédiments calcaires (il s'agit, peut-être, dans ce dernier cas, si le sédiment est très fin, d'oxygène préalablement adsorbé par les grains), elle est très mince dans les vases d'estuaires. Le tableau est très analogue à celui des sols subaériens; les sols sous-marins peuvent être classés par des agronomes.

Il nous faut maintenant examiner la nature des principaux éléments qui caractérisent ces sols sous-marins et leur donnent leurs propriétés, ceci en dehors de leur squelette. Cette étude ne saurait être faite que sur la fraction passant au tamis 350 ou, plus simplement, suivant la vieille méthode du Challenger ou de Thoulet, sur celle qui se maintient longtemps en suspension quand le sédiment, agité dans l'eau, est laissé au repos pendant dix minutes environ (*fine washings*). Ces éléments sont le *calcaire*, les *oxydes* ou *hydroxydes* et *sulfures de fer*, la *glauconie* et les particules argileuses (électronégatifs), l'*humus* et peut-être le *sulfure de fer* Fe S² (électropositif) (1).

(1) Il existe un moyen simple de déterminer le signe de la charge électrique des particules d'une suspension grossière préalablement agitée (ou des grains de sable) à travers duquel on fait filtrer de l'eau distillée (SIMON et DOGNON), c'est de les colorer par un colorant électronégatif comme l'éosine rose ou électropositif comme le bleu de méthylène. Le quartz se colore en rose (on laisse filtrer le bleu d'un mélange violet, éosine, bleu de méthylène), il est donc électropositif, comme le verre. Le calcaire, les minéraux de l'argile se colorent en bleu par le bleu de méthylène et laissent filtrer l'éosine du mélange, ils sont donc électronégatifs comme la résine.

Il est possible, grâce à un électroscope sur lequel tombent des grains de sable

CALCAIRE

Le calcaire est présent dans tous les sédiments du plateau continental. Dans les graviers et dans les sables, il provient en grande partie de coquilles marines entières ou peu brisées (ou d'autres organismes : algues calcaires, coraux, bryozoaires, etc...), qui y vivent ou y sont apportés par les vagues ou dans l'Océan par la marée et de la fragmentation de celles des bancs de coquilles sous-marines attaquées par les Éponges perforantes du genre *Cliona* (dimension moyenne des trous : 1,5 mm); elles se déchirent alors facilement, comme le bord perforé d'un timbre, sous l'effet de l'agitation sous-marine. Une faible partie est d'origine minérale, surtout sous forme de galets ou de graviers. Elle peut aussi provenir des roches de la côte quand celles-ci sont constituées par des calcaires bien cimentés, des alluvions fluviales entraînées sous la mer par les courants de boue (c'est le cas dans l'embouchure du Var) et, enfin, de dépôts continentaux ancrés sur le Plateau. C'est le cas particulièrement des graviers des bancs normands de la Manche, comme le Banc des Langoustiers. Les éléments sont alors très fortement corrodés et perforés, surtout par des Mollusques lithophages (*Saxicava*, etc...) et par des Annélides du genre *Polydora* (perforations en boutons de manchette). Les rivages de craie, en revanche, donnent très rarement des galets, cette roche étant réduite par les vagues en poudre fine facilement mise en suspension et beaucoup plus riche en phosphates que la craie elle-même.

Le calcaire est plus rare dans les *sablons* dont l'origine doit être cherchée dans le transport par les fleuves de boues limoneuses (quartz, micas, hydroxydes de fer) ou dans l'érosion sous-marine de limons ou de « head » actuellement recouverts par la transgression récente de la mer. Il est, par contre, très fréquent dans la phase *poudre*, notamment dans les « tangues » et les vases du plateau continental.

On donne le nom de *tangue* aux sédiments très calcaires, mais toujours plus ou moins mélangés de sable, qui remplissent la baie du Mont Saint-Michel, celle des Veys et de petites baies à l'ouest de Roscoff.

Les particules calcaires de la dimension des poudres existent souvent dans les vases, associées à l'humus. Dans celles d'estuaires, où elles sont

électrisés par un courant d'air sec, de mesurer la charge maxima des particules en fonction de leur surface. La surface relative d'un ensemble augmentant très rapidement quand le rayon des particules diminue, elle devient très importante par rapport à leur masse quand leur dimension diminue. Dès les poudres fines, les propriétés électriques de surface prédominent sur l'action de la pesanteur.

La cataphorèse permet aussi de déterminer le signe et probablement la quantité d'électricité dont les particules sont chargées.

Le signe électrique des particules dans une solution comme l'eau de mer dépend des ions contenus et de son pH, et aussi des colloïdes qui ont pu se fixer à leur surface. Ceux-ci, analogues aux « colloïdes protecteurs », changent le signe et la valeur de la charge des particules.

en quantité très variable, elles proviennent surtout des craies (notamment dans celui de la Seine), des Foraminifères ou des Coccolites de la craie s'y rencontrent aussi souvent.

Le calcaire est rare, ou manque, par contre dans les vases des estuaires bretons. Quand il existe, c'est sous forme de minuscules débris de coquilles surtout de jeunes de *Cardium edule*. Dans les vases du plateau continental, ce sont surtout des débris de coquilles (des premiers stades) de Lamellibranches et de Gastéropodes, de piquants de larves d'Echinides, de Foraminifères, des spicules d'Éponges et enfin de Phytoflagellés du plancton, notamment Coccolites. Des fragments d'animaux pélagiques comme les Hétéropodes ou les Ptéropodes ou de Foraminifères comme les Globigérines ne manquent pas, surtout en Méditerranée.

Il n'est pas impossible, mais nullement démontré, que les plus fines particules, de dimension parfois précolloïdale ou colloïdale (elles restent en suspension pendant des jours dans l'eau de mer), ne proviennent pas de réactions chimiques ou d'actions bactériennes.

Des rhomboèdres limpides de calcite ou parfois de dolomite (carbonate double de calcium et de magnésium), des aiguilles d'aragonite ou des lamelles de gypse qui sont fréquentes dans les vases bleues méditerranéennes, semblent s'être formées secondairement dans leur sein.

Nous n'avons jamais trouvé sur le plateau continental français de sables cimentés par du calcaire cristallin (calcite) c'est-à-dire de grès actuels à ciment calcaire, comme THOULET ou d'autres auteurs en ont souvent cités. On drague souvent (cadoules de l'Étang de Thau, roches sous-marines du large de Banyuls) des agglomérats de coquilles et de tubes de serpules qui sont de véritables roches, mais ce sont les Serpules et les Algues calcaires elles-mêmes qui assurent la cohésion de l'ensemble. Ce type de roche zoogène actuel, appelé « broundo » à Marseille, est remarquablement développé dans la Rade de Villefranche où il sert en partie de substratum à l'herbier. Il est assez fréquent aussi dans le Quaternaire de Nice. Quand un ciment est présent pour boucher les vides c'est soit un oxyde de fer manganésifère, soit de la calcite cristalline, dans les formations quaternaires.

Les grès rejetés par la mer à Faraman, les « mattes » du Languedoc sont identiques aux roches affleurant sur le littoral ou sous la mer, à l'îlot d'Antibes, à la pointe de Tuf-de-Sanary, à Port-Cros ou à l'île du Levant, à Bandol, aux Roches de Notre-Dame d'Agde et enfin au Barcarès de Leucate. Celles-ci appartiennent soit à des plages, soit à des dunes du quaternaire ancien. Elles sont recouvertes en bien des endroits par des limons rouges cimentés, exactement comparables aux formations analogues de Morée (poros), de Dalmatie, d'Italie (panchina), des Baléares (marès), du Maroc (grès de Rabat) et de La Baule-les-Pins. Il reste très probable que leur cimentation par de la calcite cristalline s'est faite pendant une période d'émersion. Leur faune a été décrite par M. MARS.

On cite aussi souvent, comme preuve de consolidation récente, le canon que LYELL a vu au Musée de Montpellier ou diverses ancrs de marine, transformées entièrement en oxyde de fer et enveloppées d'une épaisse couche de grès ou de poudingue à ciment de calcite. De tels exemples, peu faciles à expliquer, comportent toujours un noyau de ferraille oxydée. Nous en avons observé un cas très curieux à La Faute, près de l'Aiguillon (Vendée). Un treillis de fil de fer avait été posé par les Ponts et Chaussées pour empêcher les éboulements de la baie de la dune littorale. Il s'est, au bout de deux ans, transformé en un grès dur : le sable formant un manchon *aggloméré par de belles aiguilles d'aragonite*.

Rappelons, à ce propos, que les brèches ou microbrèches d'algues des îles de la Sonde, de l'îlot d'Antibes (quaternaire ancien) ou de l'oligocène marocain sont cimentées par des algues calcaires (des genres *Lithophyllum* et *Lithothamnium*, en général).

Les poudres calcaires se collent facilement à la surface des grains de quartz, donnant des sables rigides. Elles ne sont jamais revêtues de glauconie ou d'oxyde de fer comme le quartz. Revêtues d'humus par contre, même en très faible quantité, elles deviennent rigides et plastiques (vase artificielle).

FER

Le fer est présent dans le liant des sédiments marins sous trois formes : *hydroxydes, glauconie, sulfures*.

Sous la première forme, il revêt très généralement la surface des grains de sable ou de sablon des quartz des limons entraînés à la mer, ceux des « sables roux » du plateau continental.

Cette *patine* brune ou jaune extrêmement solide, est attaquable seulement par H Cl bouillant. On trouve souvent des patines analogues à la surface des coquilles (calcaires), pénétrant dans tous les pores de celles-ci. Mais elles proviennent alors, comme l'ont montré toutes les observations, d'une précédente patine noire de sulfure de fer, qui recouvre les coquilles mortes dans les bancs de coquilles au large de la côte hollandaise ou dans la baie du Mont Saint-Michel, par exemple. Une partie du fer dans les vases provient certainement de celui qui existe dans le liant des limons continentaux (notamment au Maroc) ou d'éléments détritiques du squelette de ceux-ci (magnétite, pyrite de fer, glauconie de roches anciennes et notamment du crétacé), elle est alors plus difficilement attaquable par H Cl. Une première séparation peut être faite à l'électro-aimant.

GLAUCONIE

C'est un silicate ferroso-ferrico-potassique vert qui se trouve caractéristique des formations marines à partir d'une certaine profondeur notamment des boues vertes et des sables verts au pied de l'abrupt du

plateau continental. Elle a fait l'objet de très nombreux travaux motivé par sa commodité de reconnaissance et par la beauté du minéral. Mais sa constitution chimique, et surtout son origine, ne sont encore guère élucidées (1).

La glauconie se présente sous trois formes :

1^o Grains noirs verdâtres, souvent lobés, pouvant atteindre 1/2 millimètre;

2^o Moules gris verdâtre, jaunâtre ou vert de Foraminifères, de piquants d'Oursins, de Bryozoaires ou même de perforations microscopiques d'Algues, etc... souvent discernables seulement après attaque avec H Cl;

3^o Pigments ou patine revêtant les grains de sable quartzeux ou formant enduit sur les galets, voile en avant du ciment phosphaté des concrétions (glauconie pigmentaire de Cayeux).

La première forme est cryptocristalline, la seconde partiellement, la troisième a certainement été un « sol » colloïdal.

Dans les moules de Foraminifères on trouve souvent un centre resté à l'état d'hydroxyde de fer et de couleur brune, la surface des grains oxydés présente le même aspect.

La glauconie ne semble pouvoir se former que dans les eaux très aérées, dans des conditions de turbulence excluant toute sédimentation fine. Bien qu'elle renferme parfois des inclusions de pyrite ($Fe S^2$), il semble y avoir incompatibilité entre ce minéral et la présence d' $H^2 S$ (ou de $Fe S$). La glauconie manque, par exemple, absolument dans les fonds de la mer Noire.

Les océanographes avaient localisé la glauconie, en principe, aux zones agitées au large de l'abrupt du plateau continental. L. DAN-GEARD, seul et en collaboration avec L. BERTHOIS, en a décrit plusieurs gisements dans la zone néritique, c'est-à-dire sur le plateau. Il a même signalé en avoir recueilli dans les sables littoraux (baie du Mont Saint-Michel par exemple), mais, comme il s'agit de grains, il est très possible que ceux-ci proviennent de la craie qui forme le substratum rocheux de la baie.

Quand il s'agit de grains, il est, en effet, très difficile d'en connaître l'âge, car la glauconie peut être remaniée de n'importe quelle formation géologique, sans qu'il soit possible actuellement de dire s'il s'agit d'une glauconie fossile ou actuelle. Il en est tout autrement quand on est en présence de moules, notamment de ceux qui se forment à l'intérieur de Foraminifères, quand la coquille de ceux-ci est conservée.

Il existe sur le plateau continental, à partir d'une profondeur de l'ordre de 40 mètres, des sables, déjà reconnus par les auteurs des cartes marines et par DELESSE (1871), qui entourent la Grande Vasière. Ils

(1) Madame BIRDSALL a obtenu, en partant d'un mélange de sels ferreux et ferriques, une substance verte, très voisine de la glauconie.

occupent les sortes de détroit non vaseux qui la fragmentent. Ces sables souvent graveleux portent sur les cartes marines le nom de « sables roux » par suite de la pellicule d'hydroxyde de fer qui revêt leurs grains de quartz. Ils sont identiques à ceux que, sur le plateau du golfe du Lion, Georges PRUVOT a appelé « sables du large » et à ceux que j'ai recueillis au-delà des vases sur le plateau continental du Maroc. Les coquilles qui contiennent ces sables sont ternies et de couleur gris saumon. Si, dans un verre de montre, on attaque ce sable par l'acide chlorhydrique, on obtient un grand nombre de moules gris-verts, parfois jaunes, de Foraminifères et d'autres tests creux, et un dépôt de filaments très verts qui sont les moules des perforations microscopiques des coquilles.

La nature de la faune de coquilles jaunies, particulièrement celles de Serpulien libre appelé *Ditrupa arietina* (piquants d'alènes des pêcheurs saintongeais) montre que les sables roux résultent de la destruction et de la lévigation d'anciennes vases. L'absence de phases poudre et précolloïde (de vase ou de boues actuelles) montre que ces sables se trouvent actuellement dans une zone d'agitation, empêchant tout dépôt de particules fines. La patine jaune des coquilles peut s'interpréter en admettant une patine noire préexistante. Si les oxydes de fer peuvent adhérer très fortement au quartz dans les milieux continentaux, notamment, ils ne peuvent, comme la glauconie, se fixer sur le calcaire (probablement parce qu'électronégatifs eux aussi). Il semble qu'il en soit tout autrement des micelles de Fe S ou d'hydrate de Fe S qui, sous forme de gel, vont constituer la patine noire des coquilles. Il est assez fréquent, comme nous l'avons vu, que les coquilles qui affleurent au sommet des bancs de coquilles de la Manche ou de la mer du Nord (Hook van Holland) soient jaunes, quand celles abritées sont noires.

L.-W. COLLET avait déjà observé des moules glauconieux à noyau jaune paraissant être de l'oxyde ou de l'hydroxyde de fer. J'ai, d'autre part, souvent recueilli dans la vase des moules noirs de Foraminifères constitué par du Fe S ou même de la pyrite (Fe S²). Il me semble donc possible d'admettre que l'état primitif du moule glauconieux était, non pas de l'argile, comme le pensait L.-W. COLLET (car, dans ce cas, on devrait toujours trouver trace des poussières de quartz), mais du sulfure de fer. Celui-ci, probablement au cours d'une période de régression qui expliquerait la destruction de la partie vaseuse du sédiment, a été oxydé; sa transformation en glauconie sous une action encore inconnue a dû être postérieure à la réimmersion (adjonction de Si O² et de potasse). On peut expliquer peut-être la formation des grains, en supposant qu'il s'agit de moules mis à nu par la dissolution de la coquille (une dissolution incomplète est très fréquente dans les sables roux) et leur agrandissement par les ions Si O³, K, Fe en circulation vers le fond. Les grains peuvent aussi être de simples concentrations de la glauconie remise en mouvement dans les bulles de gaz des dépôts marins. Quant à la *glauconie pigmentaire* : celle qui revêt les grains de quartz ou les galets, des sédiments du passé,

il semble, comme pour le liseré des concrétions phosphatées, qu'il s'agisse de la remise en « sol » de ce minéral pénétrant dans les plus petits pertuis, puis se transformant en *gel* et, enfin, en matière cryptocristalline. La nature du solvant reste inconnue, mais il est à peu près certain que cette remise en mouvement, comme sous d'autres conditions celle du phosphate, se fait à la partie profonde des sédiments non consolidés de la même façon que l'*alios* ou le fer se déposent à la partie inférieure des sables des graviers continentaux.

SULFURE DE FER

(Fe S n H²O appelé le plus souvent *hydrotroïlite*)

Ce minéral caractérise au contraire les vases d'estuaires, celles de la Grande Vasière (vases côtières) et les vases bleues du large du plateau, mais surtout les vases noires des mers fermées. Il se présente sous la forme d'une poudre impalpable, peut-être colloïdale, ou de sphérules de quelques μ que l'on observe notamment dans les tests de Foraminifères et les valves de Diatomées mortes. Les analyses amèneraient à considérer que sa formule est Fe S n H²O (travaux des océanographes de la mer Noire).

En général, il est partiellement attaqué par H Cl, parfois même à froid. On perçoit alors l'odeur caractéristique de H² S, décelable au surplus par le papier à l'acétate de plomb. Certains grains plus gros ont une forme cubique et semblent déjà être de la pyrite Fe S² caractéristique des vases anciennes ou « marnes ». D'ailleurs SUDRY, dans l'étang de Thau, et C. ROERICH à Royan au milieu des cristaux de gypse d'anciens marais salants romains, ont mis en évidence de la pyrite récente en cristaux macroscopiques. Les Foraminifères des carottes de H. PETTERSON ont des moules parfaits de pyrite. Le sulfure de fer est toujours accompagné d'une certaine quantité d'humus. La quantité de sulfure dans une vase semble mesurer en grande partie son pouvoir réducteur. Elle est liée le plus souvent à l'abondance de matières organiques enfouies avant leur destruction. On a autrefois expliqué ces sulfures par la transformation du soufre des albumines ou nucléoalbumines du plancton par des bactéries. L'importance du soufre par rapport à celui de l'azote dans les vases (0,024 contre 0,2 %) empêche de prendre en considération cette explication. Il existe, par ailleurs, dans l'ensemble des vases bleues (boues bleues) un tonnage énorme de sulfures, remise en mouvement et concentré à l'intérieur des coquilles fossiles au cours des époques géologiques.

Les océanographes de la mer Noire et de la Baltique ont montré que l'origine devait en être cherchée dans la transformation par des bactéries anaérobies assez variées du sulfate de l'eau de mer en sulfure, le fer provenant du continent ou, peut-être, de l'activité des ferrobactéries de la pellicule oxydante.

Dans celle-ci, les bactéries : Sulfuraires (*Beggiatoa*), Rhodothio-bactéries, etc..., ont une action inverse, oxydant les sulfures en soufre ou même en sulfates (cycle du soufre). La décomposition de la matière organique ne peut jouer un rôle qu'en formant des noyaux de concentration, qui expliqueraient les concrétions ou fossiles pyriteux.

Les recherches qui ont été effectuées dans les fjords norvégiens, et aussi l'étude que nous avons faite de la baie de Villefranche, nous ont montré que l'importance des actions réductrices par rapport aux actions oxydantes était due, outre l'abondance en matière organique (cause de réduction et aussi d'activité bactérienne), à la ventilation, c'est-à-dire à l'apport en oxygène. Quand, dans une baie fermée par un seuil sous-marin, il se produit des courants de fond dirigés vers la terre (à Villefranche sous l'influence des vents soufflant à droite de la côte), les vases noires se forment difficilement.

La transformation de l'hydrotroïlite en pyrite a été mise en évidence par L.-J.-U. VAN STRAATEN dans les vases de la mer des Wadden, en Frise hollandaise. Elle semble due à un excès de H^2S .

HUMUS

Cette substance noire est connue de tous les sols de culture, des tourbes et des fumiers. Évoluée, elle est un des constituants de la houille. La mise en évidence de l'humus est très simple. Un sol traité par $Na OH$ à 5 %, donne une pseudosolution jaune, brune ou noire, précipitant en flocons (matière noire de GRANDEAU), si on la neutralise par un acide. L'humus paraît libre dans les eaux des tourbières à réaction acide. C'est certainement un colloïde. Le précipité, qui est un « gel », débarrassé du $Na Cl$ et longuement traité par l'eau distillée, peut être transformé en un « sol » stable, mais se détruisant à la lumière.

L'humus a été découvert par WAKSMAN dans les boues bleues océaniques et par moi-même, ignorant ses travaux par suite de la guerre, dans les vases des mares, estuaires et rivières.

DEMOLON a déjà fait remarquer qu'il s'associe au calcaire en donnant des ensembles rigides. Cette association physique (qui n'implique pas d'humate de calcium) peut être détruite par des solutions très faibles d'alcali.

Les chimistes qui ont étudié l'humus semblent y voir un complexe de composition très variable, contenant notamment des produits azotés. Une purification progressive par dialyses et électrodialyses successives, nous semble conduire à l'idée que ce corps pourrait avoir une formule plus simple. L'observation courante montre qu'il provient essentiellement de la transformation de la cellulose, des hémicelluloses, et des gélouses d'algues et d'enveloppes bactériennes, etc... par des bactéries anaérobies

au sein même de la vase. Dans la pellicule biogène, la cellulose et autres constituants hydrocarbonés des fragments végétaux se transforment totalement en $\text{CO}^2 + \text{H}^2\text{O}$.

Par son attraction pour le calcaire et pour les micas et minéraux de l'argile, l'humus est un des liants les plus importants des sédiments de type vaseux. Sa recherche et son dosage qui peut être colorimétrique (si l'on a déterminé au préalable la quantité de C existant dans l'humus étudié) caractérise un sédiment. Les vases d'estuaires, les sables vaseux de plage et les vases bleues sont riches en humus, les tangues et boues blanches très pauvres. On a dit plus haut qu'il existe une relation entre la teneur en humus et celle en Fe S.

L'irrégularité de composition de l'humus provient, selon nous, essentiellement du fait qu'il est, plus encore que la matière argileuse, le corps le plus adsorbant des sols sous-marins, notamment pour les ions OH.

L'humus, dans l'évolution géologique des sédiments, se transforme dans les conditions de pression et de température superficielles en humine insoluble plus riche en C (de composition voisine de la matière des houilles); plus profondément (P et t plus élevés) en charbon et même en graphite finement divisé (C cristallin).

Il est d'usage dans l'étude des sédiments de déterminer la matière organique en dosant la quantité de carbone contenu après enlèvement du CO^2 des carbonates.

Dans le cas des sédiments littoraux, cette méthode est illusoire et ne peut caractériser le sédiment. Il suffit, en effet, de quelques feuilles de zostères, récemment enfoncées, pour faire varier du simple au double et au-delà la teneur en C. Il est possible de comparer la teneur en C total (multipliée par un coefficient au voisinage de 2 pour avoir la matière organique) à la quantité de C contenu dans l'humus.

$$\text{C'est le coefficient d'humidification : } \frac{\text{C humus}}{\text{C total}}$$

Du point de vue physique, il est plus intéressant d'étudier sur les sédiments naturels, ou mieux sur de la poudre calcaire argileuse ou des mélanges connus de calcaire et d'argile, l'influence de quantités croissantes d'humus sur la rigidité pour une teneur en eau déterminée.

ARGILE

Bien des océanographes appellent encore argile la vase ou bien, en suivant la nomenclature des pédologues, la fraction plus petite que 0,002 mm (les poudres étant qualifiées de « fins-fins », limons ou silt). En suivant les idées de Pierre URBAIN, nous réserverons la dénomination d'argile pour la fraction formée de « minéraux de l'argile », minéraux

en paillettes, formés de silicate d'alumine (ou de magnésie et de fer) hydrates tels que kaolinite, halloysite, montmorillonite, etc... auxquelles il faut ajouter les illites, et les micas altérés.

Le mica noir, profondément altéré, existe dans toutes les fractions des sédiments marins à partir des sables fins. Il prend une couleur vert pâle ou presque incolore, après départ du fer et peut-être des alcalis; il est plastique et, pratiquement, joue le même rôle que les minéraux des argiles. Il semble que, du point de vue physique, le mica et les minéraux de l'argile jouent dans les assemblages avec le quartz le même rôle que le calcaire qu'ils peuvent remplacer dans les vases. Il existerait donc des vases argileuses et des vases calcaires ou d'autres avec une proportion variée de ces éléments. Mais pour que l'ensemble soit rigide, l'un au moins de ces éléments est nécessaire. Les méthodes d'analyse thermique différentielle ou les spectres de rayons X permettent de déterminer, sinon de doser, la nature du constituant argileux d'un sédiment et, peut-être, de fixer son origine.

Ce travail, entrepris à La Jolla par Revelle et par les minéralogistes du *Meteor*, n'a pas encore été fait en France pour des sédiments récents. Mais M. MILLOT a analysé à ce point de vue la plupart des roches du Bassin Parisien.

Il est à signaler que les vases, traitées par des solutions étendues (2 %) de Na OH, mettent en liberté de l'alumine. On retrouve, sous forme de précipité gélatineux, après précipitation de l'humus par H Cl en traitant le filtrat par l'ammoniaque. On peut émettre, semble-t-il, l'hypothèse (déjà formulée par P. URBAIN) qu'une partie des très fines particules de silicate d'alumine est hydrolysée dans l'eau de mer et se trouve, à l'état d'ions Si O^3 et $\text{Al}^2 \text{O}^3$. Madame Walter LÉVY, collaborant avec moi à Roscoff, avait même cru pouvoir déterminer que la quantité de Si O^3 est dans les proportions par rapport à $\text{Al}^2 \text{O}^3$ de l'orthose. Ce feldspath, très rare dans les sables marins serait donc décomposé.

SÉDIMENTS COMPLEXES DU PLATEAU CONTINENTAL

Comme nous l'avons vu, le principe de notre classification est de ne pas prendre en considération l'origine ou les propriétés particulières des constituants pour ne s'adresser qu'à celles de l'ensemble. Par exemple : un gravier entièrement rempli de sable (ou de mortier dans la construction) a les propriétés des sables. Dans le cas-limite d'un gravier à éléments sphériques, tous en contact les uns avec les autres, ce sera quand le volume des vides du gravier sera entièrement rempli de sable. Au-delà de cette limite, pour une quantité de sable croissante et jusqu'à une quantité nulle de gravier l'appellation correcte est : *sable graveleux*. On procéderait de même pour les

galets mélangés de sable. L'élément de réplétion donne ses propriétés physiques personnelles à l'ensemble. Nous ferons donc choix, pour la discrimination entre graviers sableux et sables graveleux, de deux tests, basés sur les propriétés de capillarité des sables qui deviennent sensibles au-dessous de 2 mm.

Un sable graveleux est celui avec lequel on peut faire un « pâte », c'est-à-dire que la pseudo-cohésion capillaire peut jouer en présence d'air et d'eau. L'autre consiste à mesurer la perméabilité de l'ensemble (coefficient K de la loi de Darcy : $v = K i$). Cette perméabilité se modifie brusquement quand le liant remplit tout l'espace disponible. Cette mesure doit être faite sur un échantillon intact pris au carottier. Remarquons que les mélanges peuvent être ternaires et quaternaires, la présence de vase peut introduire une cohésion vraie dans les graviers sableux et diminuer encore la perméabilité.

On distingue donc des *galets graveleux* ; graviers avec galets, galets ou *graviers sableux*, *sables à galets* ou *graveleux*. La granulométrie fixe la proportion des différentes phases. Un ou des adjectifs peuvent servir à préciser la forme et la nature des éléments : exemple : *gravier sableux bien roulé de quartz avec coquilles et maërl*.

Il est extrêmement intéressant de mesurer la forme des éléments des galets et graviers, notamment leur indice d'asymétrie et leur indice d'arrondissement (A. CAILLEUX) et de déterminer leur nature pétrographique qui peut indiquer leur origine ; galets granitiques des plages picardes en Manche, galets de silex crétacés des grèves du Finistère et du Morbihan, gravier provenant des Corbières sur le plateau continental de Port-Vendres ou de Banyuls ou dans les cañons sous-marins, gravier durancien (du Briançonnais) dans le cañon sous-marin de Cassis, etc...

Les sables peuvent contenir des galets ou des graviers (moins de 33 % théoriquement) ; ils sont aussi susceptibles d'être mêlés de sablons ($< 0,1$ mm), de *poudres* ($< 0,02$ mm) ou de précolloïdes et de colloïdes ($< 0,002$ mm) ou des trois réunis (limons, vases). Les éléments les plus fins : poudres et colloïdes, les lamelles de mica et les diatomées peuvent se fixer à la surface des grains de quartz par exemple. Ce phénomène est en partie causé par leur « pouvoir filtrant ». Il semble y avoir identité avec la propriété des surfaces que l'on appelle *adsorption*, laquelle serait une attraction électrostatique. Nous avons déjà évoqué ce mécanisme pour expliquer la cohésion des ensembles : flocons et écumes. Une première couche serait celle d'adsorption vraie, très fortement liée à la surface de la particule adsorbante ; les autres sont plus faiblement liées. Notons tout de suite, comme l'a déjà fait remarquer V. ROMANOVSKY, que l'épaisseur d'une couche adsorbée est indépendante du rayon de la particule. Par conséquent, son volume relatif à celui de la particule augmente quand le rayon de celle-ci diminue (augmentation du pouvoir adsorbant). Si la charge électrique de la première couche n'est pas nulle,

il peut en exister une seconde et ainsi de suite. Ces couches peuvent aussi être complexes; un grain de sable quartzeux étant entouré de sablon vaseux.

Je considère donc que l'on doit appeler *sable vaseux* des sables dont la surface est recouverte de vase, *sans pour cela qu'ils perdent les propriétés des sables* : perméabilité et absence de rigidité vraie. Les tests de reconnaissance des sables vaseux sont les suivants : perméabilité de sables, sur échantillon carotté, impossibilité d'en faire une bille par modelage, existence sur le fond de vraies rides ou ripple-marks là où les courants peuvent mobiliser les particules, possibilité de faire un « pâte » avec une quantité d'eau convenable.

Il faut aussi noter qu'une dilacération trop prolongée risquerait de modifier les propriétés physiques globales de l'ensemble. Par exemple, la vase des schorres et surtout des polders est agglomérée en agrégats (dès que les ions Na sont remplacés par des ions Ca) de la dimension des sables fins. Cette agrégation lui permet d'être assez perméable à l'eau et aux gaz pour pouvoir être cultivée.

Une autre formation sableuse, ou sablonneuse, qui, écrasée, donnerait une vase, alors qu'elle est réellement perméable, est constituée par les coprolites, excréments d'Annélides ou de Mollusques entièrement faits de vase. Ces granules existent à l'état pur (sables fins) sur la côte de Guinée ou, en mélange avec la vase, en Méditerranée.

Ce que nous avons dit des galets (détermination de la forme et de la nature) vaut pour les sables. Mais ici, il faut remarquer :

1° Les grains de sable étant, en principe, formés d'un seul minéral, le plus abondant dans la nature est le quartz granitique (de dimension statistique dominante de 2 mm à 2,5 mm avant roulage), existant partout. Les autres minéraux sont plus rares, lourds et le plus souvent colorés. Ils peuvent être séparés de la masse quartzeuse en les versant sur une liqueur dont le poids spécifique est supérieur à celui du quartz (solution d'iode mercurique dans l'iodure de potassium, tungsto-borate de cadmium, monobromure de naphthalène et surtout bromoforme). C'est ce dernier liquide, qui a l'avantage d'être transparent, que nous employons au laboratoire. La fraction des minéraux qui tombe au fond porte le nom de « minéraux lourds ». Quelques-uns peuvent être séparés du stock par l'électro-aimant : magnétite, spinelle, glauconie, d'autres sont soit opaques, soit transparents. Cette méthode, que M^{lle} DUPLAIX a récemment décrite, permet de déterminer leur origine et le voyage qu'ils ont effectué. On sépare ainsi sur le plateau continental du golfe du Lion, les éléments venant du Rhône, de ceux de l'Orb, de l'Hérault, de l'Aude et des rivières des Pyrénées-Orientales.

2° Dans les sables marins une très grande partie est calcaire. Elle provient, comme nous l'avons vu, de la fragmentation des coquilles, surtout de celles perforées par les éponges du genre Cliona et des éléments

du squelette de différents animaux du fond ou du plancton (Foraminifères, piquants d'Oursins, Bryozoaires, etc...). On cherchera à reconnaître au microscope ces éléments et à en déterminer la fréquence ce qui permet des déductions sur l'origine et le milieu océanographique de cette fraction si le sable n'est pas actuel. On déterminera ensuite la proportion de calcaire et le résidu d'attaque sera examiné pour reconnaître l'existence de moules glauconieux.

La mer, à l'exception du constituant calcaire qui est presque uniquement marin, ne fabrique pas de sable. Ceux-ci proviennent :

1^o Des fleuves actuels;

2^o De sables fluviaux, de sols, d'arènes de décomposition continentales envahies par la dernière transgression et dragués par la houle. C'est le cas des sables de Roscoff (arène de décomposition sous limon), de ceux de Pampelone et probablement de la Camargue;

3^o Sur la côte NW de l'Afrique ou en Méditerranée Orientale surtout, du transport par le vent (grains lisses, arrondis, souvent recouverts d'une patine ferrugineuse), de transports par les courants de densité, enfin, quelquefois de projections volcaniques.

LIMONS

Les sablons (0,1 à 0,02 mm) représentent un constituant important des sédiments. Ils sont composés surtout de quartz en éclats avec souvent des lamelles de micas, et d'oxyde ou d'hydroxyde de fer. Tous ces éléments proviennent des *limons continentaux* (ou des loess : remaniements éoliens des limons). Quelques éléments marins s'y ajoutent : spicules d'Éponges ou d'Holothuries, Ostracodes, Foraminifères, très jeunes coquilles de Mollusques ou leurs débris. Mais il n'y a guère de sablons marins. Ils constituent une partie importante des sables vaseux et surtout des vases, leur pouvoir adsorbant leur permettant de fixer une quantité relativement importante de poudre (surtout calcaire) et de précolloïdes et colloïdes (minéraux de l'argile et secondairement Fe S, humus).

Sur nos côtes, il semble que la presque totalité du fer qu'ils contenaient est transformé en Fe S. Ce n'est certainement pas le cas sur la côte d'Afrique où les sables fins ou vases ont alors une couleur brune ou chocolat.

On peut dire que la quantité de vase littorale (qui se déposera dans les estuaires ou dans les baies abritées) est fonction de la quantité de limon apportée par les fleuves. Ceux-ci jouent certainement encore un rôle considérable, comme l'avait déjà remarqué THOULET, dans les vases du plateau continental et même dans les vases bleues qui existent autour de celui-ci presque parfois jusqu'à 4.000 mètres.

TANGUE

La tangué est un sédiment très localisé. Elle n'a jusqu'ici été reconnue que dans la baie du Mont Saint-Michel où ce nom lui a été donné, par J. JACQUET dans la baie des Veys (Carentan) et par moi-même à Régnéville et à l'ouest de Roscoff dans l'estuaire de l'Odern (schorre seulement) ou dans la baie de Goulven. Depuis très longtemps, la tangué était exploitée comme amendement calcaire ou pour en extraire le sel qu'elle a adsorbé.

La tangué est un sablon, parfois un sable, poudreux si le sable contient de 30 à 50 % de quartz (dunes du Bec d'Andaine); le sablon et surtout la poudre sont essentiellement calcaires. On y rencontre pourtant un peu de biotite décolorée, des minéraux lourds et des spicules d'Éponges ou des Diatomées. A la dimension des sables et des sablons les grains calcaires sont des Foraminifères très nombreux, des fragments de Bryozoaires très variés, des spicules d'Éponges calcaires et surtout des débris de coquilles de Mollusques très perforées par les algues ou champignons. Accessoirement on y observe des grains de glauconie (provenant probablement de la craie) et de nombreux débris de Bryozoaires turoniens et cénomaniens. La poudre (dont la dimension descend parfois jusqu'à celle des précolloïdes) est essentiellement calcaire, souvent un peu phosphatée. Il est très net qu'elle provient presque uniquement de la pulvérisation de coquilles préalablement attaquées par les micro-organismes, mais une petite part semble planctonique : coccolithes et parfois même débris de globigérines.

La tangué est une formation littorale et surtout d'estuaire, poussée par la marée par exemple bien au-delà d'Avranches. Sa granulométrie est d'autant plus fine qu'elle est recueillie plus loin de la limite des marées moyennes dans les estuaires. Le fond de la baie du Mont Saint-Michel est sableux, mais d'un sable dont la constitution est celle de la tangué.

Dans le canal du Vivier, avant l'écluse, c'est une très fine glaise calcaire qui se dépose, plastique comme une vase, produit de lévigation de la tangué. La tangué ne contient ni humus, ni sulfure de fer (par addition de ces deux éléments, elle passe à une vase). Elle est très rigide et thixotropique (c'est au Mont Saint-Michel que cette propriété des « sables mouvants » a été reconnue). Elle peut se *liter* comme la vase, mais, par rapport à celle-ci, elle est très perméable. Aussi si l'on observe dans les baies des schorres (herbus) et une slikke (tanguaie), les premières sont caractérisées par une circulation souterraine qui se fait jour, par des cirques de source, dans des marigots dont l'aspect est, en miniature, celui des cañons du Colorado.

Aucune tangué n'a été jusqu'ici reconnue sur le plateau continental; on connaît en revanche au Mont-Dol et à Régnéville des tangués anciennes parfaitement conservées.

Nos études ont montré que la tanguie provient de l'attaque par les perforants macroscopiques (Éponges) et microscopiques (Algues et Champignons) de grands bancs de coquilles anciennes, noircies, qui sont dans le fond de la baie du Mont Saint-Michel. Les autres éléments sont amenés en flottaison par la mer; ils sont planctoniques ou proviennent des fonds à Bryozoaires (au moins — 30 m). Les Algues calcaires y sont extrêmement rares.

Il y a certainement *mutatis mutandis*, une grande analogie entre la tanguie et les sables, sablons et boues coralliennes et les formations calcaires qui se font dans certaines baies méditerranéennes (golfe de Gabès) aux dépens des prairies d'algues vertes calcaires (*Udotea*, *Padina*, *Penicillum*).

La tanguie ressemble aussi à certains niveaux du tuffeau de Touraine.

VASES

Les vases sont des ensembles continus, fins, d'aspect lisse, imperméables, d'une couleur grise, beige, verte, bleue (due au Fe S et à la matière organique), parfois brunes (oxydes de fer incomplètement sulfurés ou réduits). Certaines vases sont noires et dégagent H² S. Le pH, à l'exception de celui de ces dernières, est alcalin (1). Leur odeur marine (sauf les vases noires à odeur d'H² S).

Les vases sont rigides et thixotropiques, plastiques comme les argiles. Le test caractéristique est la possibilité de faire avec elles une bille qui, séchée, devient dure et reste cohérente.

Dans leur étude, on comprendra la séparation de la fraction vase de celle sable + galets sous l'eau au tamis 350, ou par lévigation. La fraction vase sera étudiée chimiquement :

1° Teneur en C organique par combustion sèche ou humide (SO⁴ H² et bichromate de K) après déduction du calcaire;

2° Teneur en humus et évaluation du coefficient d'humification ;

3° Teneur en N et calcul du rapport C/N qui, malgré les dires de P.-D. TRASK, n'est pas constant et ne permet pas, par un simple dosage de N (microkjeldahl) d'en déduire la quantité de C;

4° Teneur en CO³ Ca;

5° En Al² O³ et Si O² libre dans les alcalis faibles;

6° Teneur en Fe et en S (sulfate exclus), rapport $\frac{S}{Fe}$;

7° Extraction des pigments à l'alcool;

8° Extraction des cires à l'éther.

(1) Voir DEBYSER, C. R. Ac. Sciences, Février 1952.

Les constituants microscopiques des vases seront étudiés en frottis minces ou en coupes minces de billes. On portera une particulière attention sur les constituants planctoniques calcaires : globigérines, coccolites; et siliceux : diatomées, silicoflagellés, radiolaires. Enfin, la nature des micas et éléments argileux peut être déterminée et éventuellement dosée.

Je considère comme fondamentale dans les vases la présence d'humus et de Fe S qui leur donnent leur plasticité et leur pouvoir réducteur. Les boues blanches ou à globigérines, vertes (à glauconie), rouge (latéritique) ne contiennent pratiquement ni humus, ni Fe S.

La vase est recouverte d'une pellicule biogène jaune, brune ou rouge, qu'elle régénère en s'oxydant (vase vivante). Les vases noires sont mortes.

RÉSUMÉ

DES PRINCIPAUX SÉDIMENTS DU PLATEAU CONTINENTAL

> 2 mm : *Galets et graviers*, formés de fragments de roches anguleux ou arrondis, perméables en grand, ni pseudocohérents, ni plastiques, peu absorbants, peuvent être mélangés de boues, de vase, de sable, qui revêt la surface du galet (graviers boueux, vaseux, sableux).

< 2 mm : *Sables*, formés de grains de quartz et de plusieurs autres minéraux plus rares et, sur le plateau continental, dans une proportion d'au moins 20 % allant parfois jusqu'à 70 %, de débris de coquilles; perméables en petit; pseudocohérents par tension capillaire, ne se rétractant pas par la sécheresse. Ils ne sont pas plastiques. Filtrants et adsorbants, ils forment, sous l'effet des courants d'air (sables parfaitement secs) ou d'eau (sables recouverts d'eau) des rides ou ripple-marks. Les sables peuvent être mélangés de boue ou de vase qui revêt la surface du grain, mais ne modifient pas sensiblement les propriétés de l'ensemble (*sables boueux, vaseux*).

Les sables vaseux sont gris ou noirs en profondeur (zone réductrice), jaune d'or dans le, ou les centimètres superficiels.

Les sables roux du plateau continental se reconnaissent après attaque par H Cl à la couleur jaune des grains de quartz et à l'existence de moules verts, vert pâle ou jaunes des Foraminifères, etc... (glauconie). Le fond du verre de montre, où l'on a fait l'attaque, est rempli de fins filaments verts (moules glauconieux des perforations de coquilles).

Vases : mélange homogène, continu, dissociable en ses éléments seulement par une forte agitation dans l'eau, aspect analogue à l'argile ou à la marne; couleur noire, grise, gris-brun (estuaires ou baies fermées),

grises, beiges, beige-vert, vertes ou bleues (plateau continental), brun chocolat dans les pays où, sur le continent, surabondent les limons rouges.

La vase est rigide (cohérente), adhésive (collante) et thixotropique (devenant liquide sous l'effet des chocs); elle est pratiquement imperméable. La vase est suffisamment rigide pour n'être érodée que par des courants rapides, capables de déplacer des galets. La rigidité, et par conséquent la consistance de la vase, dépend de sa *teneur en eau* (celle-ci se mesure en pesant la vase immédiatement et après dessiccation à l'étuve à 80°, puis dans un dessiccateur). Une quantité d'eau dépassant la « limite de liquidité » la transforme subitement en un liquide visqueux, s'écoulant sous son propre poids.

Jusqu'à une teneur en eau minimum correspondant à la « limite de plasticité », la vase peut se déformer, sans rupture. On peut en faire des billes qui, desséchées, restent cohérentes. L'évaporation de l'eau y détermine des fissures de retrait.

Constituants : les constituants de la vase se déterminent par granulométrie, après dissociation dans beaucoup d'eau : *tamissage* pour les plus gros (graviers, sables, sablons), *sédimentation* pour les plus fins. La vase peut être *graveleuse*, *gravelo-sableuse*, *sableuse*, *sablonneuse*.

Du point de vue chimique, on y reconnaît et dose le *calcaire* par H Cl, l'*humus* par traitement à Na² O (5 %) (qui donne à l'ébullition un liquide noir ou brun se clarifiant par H Cl avec un précipité noir ou brun), le *fer* se reconnaît en cuisant la vase (couleur de brique), H² S du Fe S, en attaquant la vase par H Cl dilué, au besoin à l'ébullition, les pigments, au xylène, les cires à l'éther (appareil Soxhlet).

Boues : mêmes propriétés que les vases, mais absence d'*humus* et de Fe S (voir vase).

— *Boues blanches* : plus de 30 % de calcaire, Foraminifères (souvent globigérines), coccolites, ptéropodes; peuvent être gris-vert clair, beige très clair, roses (glauconie rare), elles passent par *vanage* à des sablons à Foraminifères, à Ptéropodes.

— *Boues rouges*, souvent sablonneuses, moins de 30 % de CO³ Ca, localisées aux côtes tropicales (latéritiques) ou à limons rouges.

NOTA. — Les boues et *sables verts* (à glauconie) montrent les moules glauconieux sans attaque préalable à H Cl et des grains de glauconie. Les sables verts sont des sables roux où la dissolution du calcaire est plus avancée ainsi que la glauconisation. Leur teneur en calcaire provient de Foraminifères récents.

La glauconie dans les boues vertes revêt tous les grains.

L'une et l'autre de ces formations n'ont été reconnues que dans la zone océanique, plus bas que le plateau continental. Elles ne contiennent ni H² S (du Fe S), ni humus.

Les *boues bleues* qui entourent partout le plateau continental et remplissent la Méditerranée, parfois jusqu'à 4.500 mètres, ne sont que des vases (Fe S, humus). Elles sont aussi réductrices. Elles passent, par disparition de ces deux corps, aux *boues blanches*; comme pour les autres vases, les vases bleues ont une pellicule superficielle, brunâtre, oxydante.

Il est intéressant de recueillir l'eau des sédiments et d'en mesurer la salinité, l'oxygène dissous, le pH et le rH. Pour cela, on suspend le sédiment recueilli au sondeur dans un sac et on laisse passer la moitié de l'eau qui y est contenue pour n'en recueillir que la dernière partie.

La salinité des eaux incluses est, en règle générale, différente de celle de l'eau du fond. Sa composition chimique est aussi différente.

Les sédiments marins gardent en principe leur composition élémentaire. Mais ceux-ci s'associent pour donner de nouveaux produits : Fe S évolue en Fe S². En outre, les produits gazeux se rassemblent en bulles qui servent de réceptacles à des néoformations solides (fer, phosphates). Les recherches de H. PETERSSON ont montré que, dans les cuvettes océaniques, les sédiments gardaient sur 2.000 à 3.000 mètres de profondeur toute leur eau. Ils peuvent donc subir des transformations chimiques et même bactério-chimiques profondes. Il faut en outre ajouter que ce milieu n'est pas réellement imperméable. Liquide et gaz peuvent y diffuser, notamment pour des raisons thermiques ou électriques.

FORME DU PLATEAU CONTINENTAL

Le plateau continental entourant les continents a été découvert à Marseille par le fondateur de l'Océanographie, le comte DE MARSILLI. Mais, c'est essentiellement à l'expédition initiale du *Challenger* que l'on doit la connaissance de son ubiquité autour des continents au moins dans les régions où ils ne sont pas bordés par une chaîne de montagnes et où une de celles-ci perpendiculaire au rivage ne s'y termine pas.

Les sondages, en dehors des atterrages, étaient relativement nombreux, suffisamment pour que l'on puisse avoir une idée de la forme de cette auréole des continents. Elle apparaissait comme plate, prolongeant vers le large les plages ou les grèves de la zone littorale et se terminant brusquement sur de grandes profondeurs par un abrupt qu'il est classique d'appeler talus continental. Le sommet de l'angle que forme le plateau et le talus est un point remarquable (*Continental edge*). Depuis très longtemps, on a reconnu qu'il se trouvait à une côte voisine de — 100 brasses.

Comme il a été dit plus haut, malgré l'intérêt théorique du plateau, fragment important de la Marge continentale, théâtre des allées et venues de la mer au cours des temps géologiques (transgressions et régressions) sur lesquelles sont basées les divisions du temps en géologie historique, malgré tout l'intérêt pratique de sa connaissance : navigation par temps

de brume, navigation sous-marine, recherche de fonds chalutables, reconnaissance de zones dangereuses pour les chaluts ou devant servir de réserves nationales (gisements métalliques ou d'hydrocarbures à exploiter), les expéditions océanographiques se sont plus préoccupé de la topographie, de la nature des fonds et des conditions physiques des grandes cuvettes océaniques que du plateau. Ce n'est que récemment que l'Océanographie américaine y a porté ses efforts et en a donné des cartes en courbes de niveau.

Une profonde modification dans les méthodes de levé a été nécessaire pour en arriver à ce point, tant dans les méthodes qui permettent de fixer la position que dans celles de sondages.

Les formes du terrain du plateau étant invisibles et inconnues, elles ne peuvent être déterminées que par interpolation dans un semis très serré de points. Pour fixer la position exacte de ceux-ci sur la carte et pour obtenir une densité uniforme, il est nécessaire d'exécuter à bord des bâtiments hydrographes un réseau indépendant des routes normales de navigation, les premières reconnues.

La forme même du plateau conduisait d'abord à exécuter des « radiales », c'est-à-dire à sonder suivant des lignes perpendiculaires au littoral, vers l'abrupt. Les radiales présentent par ailleurs un très grand intérêt océanographique (répartition des fonds suivant la profondeur, localisation de stations hydrologiques pour déterminer indirectement, par mesure de salinité et de température, les courants qui agissent sur le plateau.

La découverte sur le Georges Bank d'abord, puis sur l'ensemble du plateau de la côte est des États-Unis et de la Californie ensuite, de tout un réseau de « cañons sous-marins », en principe perpendiculaires à la côte, des prolongements sur le plateau de quelques-unes des rivières du continent (cours sous-marins et deltas submergés), conduisait à exécuter des « coupes » perpendiculaires à ces traits de la morphologie, cette fois plus ou moins parallèles au littoral. Les méthodes d'application courante depuis l'entre-deux-Guerres, de sondage *continu*, conféraient à ces coupes, qui même à leurs *termes* n'étaient pas très précisément déterminées, une incontestable valeur pour la connaissance du plateau. Nous en discuterons plus loin.

La détermination des points de départ et d'arrivée des radiales ou des coupes pose un problème délicat. Aux abords des côtes, le relèvement par un appareil goniométrique (sextant, cercle hydrographique) à partir de la passerelle ou des signaux terrestres (les opérations nocturnes sont souvent plus faciles) est souvent relativement facile, mais dès que l'on perd de vue la côte — ou qu'elle s'estombe — le travail devient impossible. On est alors obligé de recourir à la méthode qui consiste à mouiller des bouées et à se relever sur celle-ci ou, méthode anglaise, à mouiller une ancre à laquelle est attaché un fil mince que dévide le bâtiment; la longueur de ce fil donne avec précision la distance du point de mouillage.

L'introduction dans la marine des États-Unis du *radio-acoustic ranging* ; après 1945, la possibilité de déterminer le point sur les réseaux de guidage radioélectrique, l'utilisation, avec ou sans répondeur, du radar et notamment de la méthode azimuth-distance permet de résoudre plus facilement le problème : « En quinze jours de travail, pendant le mois de juillet 1937, le bâtiment sondeur *Lydonia*, du C.G.S., a effectué 12.489 sondages sur le talus continental et couvert une surface de 1.764 milles carrés à plus de 150 milles du littoral, tous appuyés par *radio-acoustic ranging* et fil dévidé sur le réseau de triangulation nord-américain. »

Si l'on pense aux 504 sondages profonds du *Challenger* et aux 3.195 du *Blake* entre 1874 et 1879, on peut mesurer les possibilités ouvertes actuellement à l'étude morphologique du « plateau ».

La nécessité, avant toute opération de précision, comme d'ailleurs en topographie terrestre, de reconnaître les traits principaux de la morphologie, pour orienter le réseau avant de lever, est capitale. Le travail, effectué avec le Chasseur 142, sur le cañon sous-marin de Port-Vendres (rech Lacaze-Duthiers) nous en a montré tout l'intérêt.

Ces recherches ont immédiatement indiqué que le plateau continental n'était pas la plaine unie qui est décrite dans les traités : des collines, des fosses, des dômes (dans le golfe du Mexique), des crêtes aiguës, voire des pics isolés l'accidentent.

Les observations géologiques ont souvent d'ailleurs confirmé les sondages. A ce point de vue, il semble que l'exemple du paysage le plus compliqué que l'on ait jusqu'ici entrevu soit la côte basque et asturienne du golfe de Gascogne, en partie explorée par le *Président Théodore Tissier*, et la côte occidentale du Portugal. La première semble offrir l'aspect d'une chaîne bordière du type du Jura, avec longues dorsales et dépressions parallèles au littoral espagnol, qui serait en avant du grand anticlinal pyrénéen. (Nous étendons le nom de Pyrénées à l'ensemble de la chaîne est-ouest qui borde le pays basque, les Asturies et la Galice, de la Bidassoa au cap Finisterre.) Des galets fluviaux ont été dragués dans cette région par BERTHOIS et FURNESTIN.

Le littoral portugais de l'Atlantique borde un synclinal de terrains secondaires. Son flanc occidental se trouve sous la mer, mais apparaît déjà au Berleingas (gneiss). La topographie du plateau continental semble faire ressortir toute une série d'alignements NE-SW ou NNE-SSW, continuation des failles continentales et qui semblent se prolonger bien au-delà du plateau vers les « bancs » et îles océaniques (Madère, Groningue, etc...).

L'étude de la région de Safi-Cap Cantin au Maroc a permis au *Rusé* et à l'*Éveillé* de déceler de véritables murailles de roche, sur le plateau, dangereuses pour les chaluts.

Après les expéditions du *Travailleur* et du *Progrès* au large de Marseille, MARION indiquait la complication du plateau dans cette région : « La présence d'une falaise de 30 mètres entre Planier et le cap Croisette et de deux autres falaises sous-marines bordant deux plateaux

d'altitude différente : la falaise Peysonnel et la falaise Marsilli, dédiée au découvreur du plateau continental. » Il en serait de même à peu près au large de Sicié, aux abords du littoral. Nous verrons plus bas (p. 43) que l'on peut donner une toute autre interprétation aux sondages de MARION.

Sur la côte vendéenne, les plateaux gneissiques faisant saillie au milieu de la plaine plus ou moins uniforme sont connus depuis longtemps, mais ils n'excluent pas une topographie de détail extrêmement complexe (Quiberon, Roscoff) qui n'est qu'une topographie côtière ennoyée et dont la connaissance est des plus utiles aux pêcheurs.

Au Maroc, les dunes cimentées du quaternaire ancien forment la côte entaillée de falaises par la dune. Vers l'intérieur, cette dune est bordée de toute une série de chaînes parallèles de même nature qu'escalade notamment la route principale de Casablanca à Marrakech jusqu'à Mesiouna. Dans la région de Fedhala-Mansouriah, la première dune littorale est précédée en mer de deux cordons littoraux ou dunes sous-marines dont la roche a pu être draguée. Nous citerons plus loin les roches du Roussillon.

En dehors de ce relief « positif », dangereux aux chaluts et aux sous-marins, mais gîte de divers Poissons et Crustacés, le plateau présente un relief « négatif » dont des exemples sont connus depuis longtemps : les prolongements sous-marins des fleuves et rivières, les cañons sous-marins.

Un certain nombre des principaux fleuves paraissent se continuer sous le plateau par des sillons très marqués : le fait est connu depuis longtemps pour l'Hudson, le Congo, l'Indus, etc... HULL a donné une carte du cours du Rhin et de ses affluents en mer du Nord ; Ed. LE DANOIS a tenté de restituer le cours en Manche de la Seine submergée et de ses affluents de l'estuaire aux bancs de la Grande Sole et de la Petite Sole (mer Celtique). Ces derniers travaux, appuyés sur la découverte de galets roulés, mériteraient des levés plus précis.

Depuis longtemps, sur la base des sondages très serrés des cartes marines, Em. DE MARTONNE a pu dessiner en rade de Brest les méandres submergés de l'Aulne. L. COLLIN, récemment A. GUILCHER, utilisant la même source de renseignements ont étudié les prolongements sous-marins d'autres rivières bretonnes, mais aucune n'a fait l'objet d'un levé spécial. J'ai publié un essai de cartographie du réseau fluvial ancien de la rade de Brest dû à Cl. FRANCIS-BŒUF ; et mon levé de la rivière de Morlaix et de la Penzé et de leur coude de capture récent.

Les cañons sous-marins sont très anciennement connus : sur nos côtes le « Gouf de Cap Breton » levé avec précision en 1936 par le commandant BEAUGÉ, a été l'objet de longues discussions, notamment par Ed. SUESS dans la « Face de la Terre », les cañons américains de Georges Bank sont connus depuis DANA, Georges PRUVOT a figuré dès 1893 les rechs de Banyuls et MARION a grossièrement esquissé le réseau

de Cassis. FREIRE DE ANDRADE et moi-même avons essayé de dessiner ceux du plateau portugais. Depuis, une très grande quantité de ces cañons a été trouvée dans toutes les mers et sous toutes les latitudes. Leur origine pose un des problèmes les plus controversés de la morphologie sous-marine. Nous reviendrons plus loin sur ces discussions.

Ces cañons sous-marins, à l'exception de ceux de l'Hudson, du Congo et de l'Indus, ne correspondent visiblement pas à des rivières subaériennes. Ils se terminent le plus souvent en cul-de-sac, en cirque encaissé dans la partie inférieure du plateau, la rupture de pente étant à une cote de l'ordre de celle de l'abrupt. Bien que leurs formes soient assez variées, ils offrent de grands traits de ressemblance entre eux et avec les gorges des pays calcaires dont ils ont pris le nom. Des échantillons de leurs parois et de leur remplissage ont même pu être dragués et ils semblent tous de même âge. Les escarpements ont été photographiés par SHEPARD.

Le *Coast and Geodetic Survey* des États-Unis, en association avec les grands établissements océanographiques de ce pays (Woods Hole, La Jolla), depuis quelques décades a tenté de cartographier ceux du Georges Bank, sur la route de la côte atlantique de ce pays et en Californie. De très belles cartes en ont pu être dessinées notamment par VEATCH et SMITH, SHEPARD, STETSON.

Les grands prolongements de fleuves actuels, débutant d'abord par une pente faible, comme celle de l'Aulne, s'encaissent brusquement aussi en cañons et accentuent celle-ci quand ils atteignent la cote (— 150 en général) du bord du cirque initial des cañons. Ils semblent de même nature et de même âge.

L'exploration par MARTI — l'inventeur des sondages par écho — en 1936 et 1937, du plateau continental du golfe du Lion a montré que, en sus des trois rechs découverts par PRUVOT, quatorze cañons analogues l'accidentent entre le cap Creus et Cassis. Nous avons poursuivi cette étude à bord de l'avis de recherches sous-marines *Ingénieur Élie Monnier*. Les résultats provisoires en ont été publiés et une carte d'ensemble réunit ces résultats à ceux de MARTI.

L'intérêt théorique de ce trait de la morphologie océanique expliqué est très grand, mais l'intérêt pratique ne fait pas défaut. Outre le fait que les cañons fournissent d'excellents repères en golfe du Lion notamment, et que leur connaissance est nécessaire à la navigation sous-marine, les pêcheurs semblent attirés par leurs cirques d'origine où le poisson serait plus abondant, comme si un courant les remontait actuellement. Une étude hydrologique s'impose donc.

Enfin, l'expérience que j'ai acquise en Méditerranée, m'a montrée que ce n'est que grâce à la paroi des cañons que l'on peut avoir une connaissance directe de la géologie du plateau. Les rares résultats obtenus jusqu'ici sont absolument inattendus et du plus haut intérêt.

La drague *Charcot* accroche en effet les aspérités de la gorge et rapporte des échantillons indiscutables parce que la partie extérieure est patinée de noir manganésique, ou recouvert d'animaux fixés; la cassure est au contraire fraîche.

Les graviers et la vase du remplissage des cañons contiennent en outre une faune froide, périarctique même, aussi intéressante que l'étude de l'origine de ces graviers.

Enfin, plus près du littoral, bien des traits morphologiques retiennent notre attention : bancs, deltas fluviatiles submergés comme celui de la Gironde qu'a découvert LÉVÊQUE, cordons de sable parallèles à la côte mis en évidence lors des études du débarquement et qui semblent la forme normale d'engraissement des plages par la houle. Ces traits mineurs et peu profonds peuvent être directement observés avec les scaphandres légers et autonomes du type Cousteau-Gagnan.

GÉOLOGIE SOUS-MARINE

Les premières recherches dans cette direction ont été faites en Manche par le commandant CHARCOT sur le *Pourquoi-Pas?* à l'aide d'une petite drague particulièrement robuste. Ils ont été résumés dans la thèse de Louis DANGEARD. BERTHOIS et FURNESTIN, à bord du *P.T.T.*, et moi-même avons aussi recueilli quelques échantillons qui s'ajoutent à des indications plus anciennes éparses dans la littérature et à l'étude, toujours fructueuse et peu onéreuse, des galets rejetés par la tempête sur les côtes. Mais, en dehors des formations meubles, facilement attaquables par la drague, comme les tourbes et argiles à blocaux de la mer du Nord où HULL a même dragué du Mammouth, les résultats sont maigres : surtout des blocaux épais, parfois l'arrachement d'une pointe de rocher affleurant en surface.

La raison en est la grande horizontalité du plateau. Quelques résultats ont pu être obtenus sur le rebord, mais ils sont extrêmement rares.

PIGGOT a imaginé un sondeur canon dont un autre type a été construit par la Maison Schlumberger, qui peut permettre d'obtenir des « carottes » de roches relativement tendres. Mais il s'agit toujours d'explorations de la stricte surface. Seul, le dragage des parois des cañons sous-marins permet avec bien plus de difficultés sûrement que sur le continent, d'obtenir des coupes plus profondes. STETSON au Georges Bank, SHEPARD et ses collaborateurs en Californie, moi-même dans le golfe du Lion avons obtenu de beaux résultats en employant cette méthode.

Enfin, en Amérique Maurice EWING, en Angleterre E.-C. BULLARD et T.-E. GASKELL ont appliqué au plateau continental, les méthodes de prospection sismiques classiques sur le continent pour les champs

pétrolifères (1). La technique a été parfaitement mise au point pour les faibles profondeurs, elle est en voie de perfectionnement pour les plus grandes. Les résultats sont en totale contradiction avec les idées antérieures que les géologues se faisaient du plateau continental et de la géologie des Océans.

Il y avait, en effet, deux façons de concevoir comment se prolongeaient sous la mer les affleurements des divers terrains reconnus sur le continent ainsi que le tracé des chaînes plissées (tectonique).

On a d'abord prolongé par un pointillé à travers les océans les limites des différents bassins sédimentaires (les anciennes mers) et joint de même les différentes chaînes plissées reconnues sur les continents comme étant de même âge.

La première figuration a conduit à des cartes paléogéographiques où ces mers anciennes sont séparées par des crêtes, des seuils, voire des continents actuellement submergés, parfois jalonnés par d'anciennes îles. Celles-ci formaient des « ponts continentaux » permettant d'expliquer, par delà les mers, les curieuses ressemblances, parfois même les identités qui existent entre les faunes et les flores de deux continents séparés par l'Océan. Quelques-uns sont même simplement *déduits* de considérations purement biogéographiques.

De même, les relations des faunes marines actuelles ou surtout du passé a conduit à figurer ainsi des communications entre les mers. En sorte que, si l'on suit ces idées, la géographie sous-marine des océans Atlantique et Indien, voire de la Méditerranée, n'est que la suite de la géographie continentale, effondrée, ou mieux ennoyée sous les mers.

De nombreux tectoniciciens ont aussi cherché en suivant la seconde méthode à *prolonger* les chaînes plissées de la chaîne hercynienne d'Europe vers les Appalaches, de la chaîne calédonienne (par les « Monts » Minia), d'Écosse en Nouvelle Écosse, des chaînes atlantiques vers les Antilles et, à travers la Méditerranée de la chaîne pyrénéenne vers la Provence, des Apennins vers l'Atlas par l'« isthme sicilo-tunisien ».

Une connaissance plus avancée de la topographie sous-marine a bien créé quelques difficultés : si l'Atlantique, dans sa partie sud, offre bien des traits structuraux analogues à ceux de l'Afrique et du Brésil (grandes cuvettes séparées par des seuils ou rameaux) un trait qui lui est propre, sa grande Dorsale, sorte de chaîne plissée en S renversé, bouleverse ces conceptions. En Méditerranée, au lieu que les formes du sol sous-marin laissent entrevoir un prolongement de la Cordillère Bétique vers les Baléares ou des Pyrénées vers la Provence, ce sont de profondes zones ovales, très régulières que les sondages décèlent.

A de beaucoup plus faibles profondeurs, la Manche interrompt la continuité entre les Cornouailles et la Bretagne ou les deux régions jurassiques tellement similaires de part et d'autre de cette mer, qu'on

(1) La méthode par réflexion, récemment mise au point par WEIBULL, et la méthode par réfraction qui seule donne la nature du bed rock.

les joindrait volontiers. Paul LEMOINE, puis Louis DANGEARD, à la suite des dragages du *Pourquoi-Pas?* ont montré que des blocs assez volumineux de jurassique, de crétacé et d'éocène pouvaient y être dragués, entre le cap de la Hague et le cap Saint-Mathieu. J'ai dragué moi-même une Nummulite méridionale au Trou aux Raies au large de Roscoff. Ces observations s'ajouteraient aux trouvailles de silex et même de blocs de craie, faites sur les grèves de Normandie ou de Bretagne depuis LEBESCONTE.

L'idée que la Manche est un synclinal rempli par des formations secondaires et tertiaires, voire de pliocène marin, se faisait jour. En 1945, j'ai découvert en place la craie turonienne dans la baie de Roscoff.

Des indications analogues existent dans l'Atlantique : Crétacé et surtout nummulitique, miocène, quaternaire ancien à faune canarienne rejetée sur les plages, dragages des mêmes produits, découverte en place du nummulitique à Gâvres (plateau sous-marin) et à Quiberon. FURNES-TIN avait obtenu du Rebord du Gouf du cap Breton des échantillons nummulitiques. La côte marocaine m'a fourni de nombreux échantillons de pliocène, notamment des concrétions de phosphate. Le crétacé, le nummulitique et le pliocène sont connus par taches sur tout le littoral africain.

Enfin, en Amérique, nous possédons les résultats morphologiques (D.-W. JOHNSON) de l'exploration du golfe du Maine, qui montre une *cuesta* submergée qui ne peut être que calcaire.

La surface du *basement complex*, essentiellement granitique pend vers le large, recouverte de couches secondaires et tertiaires de plus en plus épaisses à mesure que l'on va vers le large.

Tous ces faits ont été perdus de vue, par suite du succès immense qu'une toute autre théorie, celle de WEGENER, a obtenu après la guerre de 1914 : l'Atlantique serait une fente ouverte dans l'écorce jusqu'au *Sima* visqueux et l'Amérique du Nord au cours des temps secondaires, tertiaires et surtout quaternaires, s'éloignerait de l'Europe en dérivant, comme l'Amérique du Sud de l'Afrique.

Les remarquables analogies de terrains, de structure et de faunes entre l'Afrique et l'Amérique du Sud ont fait le succès de la théorie.

Combattue d'abord par les géophysiciens qui ont toujours montré l'insuffisance des forces auxquelles il est fait appel pour la dérive, par les astronomes pour les preuves directes (variations de longitude, signaux horaires de l'Observatoire de Paris), par les sismologues qui ont insisté sur l'impossibilité que les vitesses de transmission des ondes superficielles des tremblements de terre traversant l'Atlantique puissent être celles dans du *Sima* (fond du Pacifique) (1) ont conduit WEGENER à préciser et modifier sa théorie au cours des éditions successives de son livre. Mais, comme il était la base des conceptions d'Émile ARGAND sur le mécanisme de formation de la chaîne alpine, qu'il fournissait des expli-

(1) Pourtant Maurice EWING, contrairement à Gutenberg, admet, à la suite de nouvelles mesures, que le fond de l'Atlantique est fait de *sima*.

cations commodes aux biogéographes, le livre de WEGENER, plaider plutôt qu'exposé scientifique, a gardé quelque crédit en France alors que les coups les plus rudes lui ont été portés dans l'Atlantique sud par ses compatriotes du *Meteor*.

Une discussion de cette théorie universelle ne peut rentrer dans le cadre de ce travail. Mais WEGENER a émis sur le plateau continental et sur certains de ces traits (cañons sous-marins) des idées qu'il nous faut examiner. Le plateau ne serait que le vrai bord des continents : l'abrupt ou Rebord correspondrait à la fracture qui sépare les divers blocs, fissure qui, au cours des temps, va en s'élargissant. C'est la limite du bloc sialique flottant sur le sima.

Quant aux cañons, ce ne serait que des fentes dues à l'appatissement de ce bloc. Chemin faisant, les idées se sont un peu modifiées et l'on a parlé de Sial étiré pour le fond de cet océan pour tenir compte des objections de GUTENBERG, d'épaves sialiques pour la crête médio-atlantique ou d'archipels comme Madère ou les Canaries.

Les recherches entreprises, à la fois sur terre et en mer, par Maurice EWING dans la *Coastal Plain* et sur la radiale du cap Henry au bord du plateau par la méthode sismique artificielle ont montré que le *basement complex* (ici granitique) s'abaisse rapidement et, qu'au bord du plateau, il est recouvert de 12.000 pieds (4.000 m environ) de sédiments peu consolidés ou non consolidés. On les attribue, d'une part au secondaire et au tertiaire, d'autre part au quaternaire.

Les recherches côtières, ou à la surface du plateau européen, conduisaient à la même interprétation. En France et en Angleterre, il serait formé de crétacé et de nummulitique, d'un peu de miocène et de pliocène voire de quaternaire ancien. Des recherches du type de celles d'EWING ont été entreprises à 175 milles WSW du cap Lizard. Elles ont montré une structure analogue à celle des États-Unis, mais avec une moindre épaisseur de sédiment. L'Atlantique serait donc, comme la Manche, mais à une autre échelle, un synclinal interrompu peut être comme le voulait HAUG par un anticlinal : la crête médiane. En outre, un de nos dragages et une récolte faite par les Anglais entre 2.500 et 3.000 mètres au large de la Manche y ont trouvé de l'oligocène à faciès néritique. EWING et TOLSTOY, dans les mêmes conditions, ont récolté au pied du socle américain, de l'éocène supérieur. Mais une autre conclusion peut en être dégagée.

Si le plateau continental du golfe de Gascogne est fait de crétacé et de tertiaire, les îles comme Quiberon : Houat et Hoedic, Belle-Ile, Noirmoutiers et le plateau Rochebonne seraient des anticlinaux primaires séparés par des synclinaux crétacés et tertiaires. On voit tout l'intérêt que peut avoir une géologie plus précise de ce plateau et les motifs que le président Truman a eu de l'annexer au territoire fédéral des États-Unis.

Encore un exemple : la continuation de la faille de Dax se trouve aboutir près du Gouf de Cap Breton. On sait les sources hydrothermales qui la jalonnent. Il n'est donc pas impossible de trouver, très rapprochées des eaux à 70° et celles très froides du Gouf, dans des conditions utilisables pour un moteur thermique.

LIMITES DU PLATEAU CONTINENTAL

La *limite supérieure* du plateau continental n'est, en principe, pas très difficile à fixer, c'est celle du domaine maritime (ligne de mer), c'est-à-dire des plus hautes vagues de tempête. Elle se marque dans tous les cas où le continent est érodé par une falaise ou une microfalaise. Les vallées larges où le cours d'eau est insignifiant et où l'apport fluvial et surtout marin est suffisant sont barrées par un cordon littoral qui lui-même peut être sculpté en microfalaise. Dans les estuaires, rias et calanques : vallées envahies par la mer, la seule limite est celle de la marée; dans les mers sans marée, celle de diffusion du sel.

Vient ensuite la haute plage ou grève de tempête, zone essentielle d'accumulation, l'estran, moins incliné, zone d'allées et venues de la mer (ce nom adopté pour les plages peut s'étendre aux grèves rocheuses), très réduit en Méditerranée; puis la plage ou grève sous-marine.

CORNAGLIA a établi que, pour une pente donnée et une force déterminée des vagues, il existe pour chaque matériau (caractérisé par sa densité, sa dimension et sa flottabilité) une ligne neutre séparant le mouvement vers le rivage du mouvement vers le large.

Cette conception qui n'est basée sur aucune expérience, reste actuellement entièrement théorique. La seule mesure possible est le bilan d'une zone à une époque déterminée. Le type de pareils travaux est celui effectué par M. VOLMAT en baie de Seine et par les Italiens pour divers points des côtes de la Méditerranée. Ceux-ci se sont uniquement servis de la comparaison des cotes des éditions successives des cartes marines. Des études de ce type peuvent également s'accompagner de la variation de la ligne de mer au cours des temps. De pareils travaux impliquent une confiance dans l'égale précision des documents utilisés. Le C.O.E.C., ayant saisi toute l'importance pratique de pareilles études, a choisi un certain nombre de plages-témoin qui doivent être périodiquement nivellées, pour la zone accessible, par le Service Maritime des Ponts et Chaussées, pour la zone navigable (elles se recouvrent l'une l'autre) par le Service Hydrographique de la Marine. En temps de calme et de tempête, des prélèvements de sable seront effectués pour être analysés granulométriquement et du point de vue de l'origine des minéraux lourds.

Aux États-Unis, de pareilles études sont confiées aujourd'hui à un service public : le *Beach Erosion Board*.

Comme il a été dit, il y a une grande différence entre les plages de sable, variant sans cesse, mais où en moyenne un équilibre doit s'établir, et les vases ou tangues qui colmatent (engraissent) sans limite les embouchures. En effet, si une plage s'élève au-dessus de son profil d'équilibre, elle est ravagée par des courants plus puissants, tandis que la vase ou la tange déposées sont plus difficilement attaquables et, essentiellement, s'éboulent.

Les conditions des plages à cordon sont plus complexes car il est probable qu'en cas d'apports continus, le cordon le plus près du rivage avance.

Dans la plupart des cas, l'engraissement des plages est d'origine marine : les grands fleuves de l'Océan, avant l'estuaire, ne peuvent — en régime normal — transporter que des limons. Tous ceux qui se terminent dans un étang, une lagune ou un limon (mots à peu près synonymes), forment, comme le Nil et, en partie, le Rhône, un *delta* fermé au-delà duquel le fleuve ne transporte à peu près rien. C'est la conclusion de STETSON pour la moitié sud de la côte des États-Unis. Les seuls cours d'eau dont la pente est très rapide et les crues très fortes transportent à la mer galets, graviers et sables. A la fois superficiellement et au fond par courants de densité dans les estuaires à marée, la charge limoneuse peut être entièrement fixée par la formation de vases. Les cours d'eau méditerranéens, en revanche, se suivent au large par leur couleur, fort loin en mer (Nahr-el-Kébir, en Syrie, Var, en France, par exemple). Il semble qu'il en soit de même en crue pour les mers à marée. La question serait beaucoup éclaircie par des mesures du débit flotté ou du débit roulé (avec des *sediment-trapps*) en fonction du courant.

Comme très peu de sables résultent de l'attaque des falaises, à moins qu'elles soient composées de matériaux meubles, une très grande part des matériaux apportés à la côte provient forcément de produits meubles accumulés sur la plage sous-marine et dragués par les vagues. J'ai déjà cité l'exemple de la côte des Landes, entièrement sableuse, qui reçoit des galets de bancs sous-marins plus ou moins reformés en cordon qui proviennent des alluvions d'anciennes rivières pyrénéennes à cours SSE (ou SE), tronqués par l'Adour actuel, passant en tunnel sous la Lande. Les cailloutis sur la plage varient de zone à zone et, par leur nature pétrographique, caractérisent chacun un bassin d'alimentation bien déterminé.

Les sables et galets de Gâvre proviennent de l'érosion du pliocène supérieur sous-marin et des calcaires nummulitiques en bancs également sous-marins, ceux de Roscoff du limon et de ses arènes ou du head dans les parties ennoyées, les sables de Pampelonne de sols sableux graveleux et limoneux de la baie. Il faut aussi dans l'Atlantique réserver une part importante au transport par les algues.

Une question restant à l'étude, et vérifiable par la méthode des minéraux lourds, est l'effet de la composante de la houle oblique parallèle au rivage ou même du transport des galets, notamment des galets exotiques dans ce sens.

Souvent évoquée dans les exposés théoriques, elle n'a encore jamais été l'objet que de peu de travaux expérimentaux ou d'études systématiques.

Dans le cas, pratiquement très intéressant de la baie de Seine, l'immersion de fluorine, minéral lourd très caractéristique et n'existant pas dans les sables locaux, peut permettre de dire si le courant venant de Cabourg ou de Trouville est ou non responsable de l'engraissement des bancs du Ratel à l'entrée de l'estuaire.

On peut dire, actuellement, que l'idée que les produits de l'érosion fluviale ou marine du continent augmente rapidement l'épaisseur des dépôts du plateau continental, voire même conditionne leur avancée au-delà du Rebord vers la cuvette océanique, n'est nullement fondée sur des faits expérimentaux pour ce qui est des galets, graviers et sables, seul l'envasement conquiert définitivement du terrain.

La *limite inférieure* du plateau continental est, en général, aussi nette : une rupture de pente (*Shelf edge*), est souvent immédiatement reconnaissable par une brusque augmentation de la profondeur. Mais les idées théoriques que l'on se fait sur la nature de cet abrupt (relatif : 14°) sont très variables et sa connaissance directe assez réduite.

Pour MURRAY et ses continuateurs, il semble que le Rebord continental doive être considéré comme le front d'un delta qui avancerait indéfiniment vers la cuvette océanique. Le transport des matériaux au-delà de la ligne neutre se faisant vers la mer, ce delta serait le symétrique de la haute plage. La surface des sédiments étalés sur le plateau serait sans cesse vannée par les courants de houle. Dès — 200, cote fixée classiquement pour le sommet de l'abrupt, les matériaux fins seuls subsisteraient, c'est la *mud line*.

Pour RICHTHOFFEN et les partisans de la création du plateau par « abrasion marine » le Rebord continental serait au contraire rocheux. Dans bien des cas : entrée de la Manche, côte Saintongeaise du golfe de Gascogne (fait déjà reconnu par le « Caudan »), côte du Maroc, « falaise Peyssonnel » à Marseille, c'est bien une falaise rocheuse. Elle est revêtue d'animaux fixés et notamment d'*Amphihelia oculata* (Coralliaire) vivants ou morts, dans ce dernier cas souvent patinés de fer et de manganèse. C'est également le cas des parois des rechs (rivières sous-marines) que l'on peut considérer en principe comme faisant partie de l'abrupt.

Dans le Roussillon, et probablement sur toute la côte languedocienne, les cañons sous-marins sont très rapprochés. Ils commencent avant de s'encaisser par une vallée assez large et sont séparés par des pédoncules (rameaux de ligne de crête dirait-on en topographie terrestre ou « interfluves »). Il semble que, dans ce cas, la pente du Rebord soit beaucoup plus faible, mais qu'elle s'accroisse assez rapidement vers le large. Ces

pédoncules sont alors souvent recouverts de sables roux de plus en plus vaseux pour être recouverts de vase bleue vers — 500 ou — 1.000 mètres. Mais notre connaissance est encore insuffisante. Grossièrement, il faut tout de même encore parler de rupture de pente, mais elle est plus difficile à définir. L'image est analogue à celle du pied de la montagne vers la vallée du Rhône, plongeant tantôt par des pentes accessibles et des vallées encaissées, tantôt par un véritable abrupt vers la plaine alluviale.

La cote même de la rupture de pente est fixée à 100 brasses ou — 200 mètres dans tous les ouvrages classiques. La raison en est, avons-nous dit, que cette profondeur est une des courbes à cote ronde, choisie par les océanographes et notamment par la Carte Générale Bathymétrique des Océans qui n'utilise ni la courbe 150, ni les courbes 300 et 400 comme limite de teinte.

Les erreurs dues aux teintes hypsométriques sont presque classiques pourtant. L'Anatolie, haute plaine séparée de la mer par la chaîne de Cilicie, en majorité au-dessus de 1.000 mètres devient sur la carte au 1/5.000.000 et sur tous les atlas, un massif élevé, soudé à cette chaîne qui la limite. Du point de vue du morphologiste, du biogéographe, du forestier et de l'hydrographe, la notion de « montagne » coïncide avec celle de *pentès fortes* et non d'*altitude*. A ce point de vue, des teintes océanographiques, obtenues comme sur la carte au 1/80.000 par la méthode des hachures et la « loi du quart », seraient beaucoup plus pratiques que les teintes hypsométriques.

Sur le littoral des États-Unis, la profondeur de la rupture de pente croît du Nord vers le Sud, en même temps que la largeur du plateau diminue. Il semble qu'il en soit de même (d'après, notamment des indications de DE JOLY) pour le plateau continental français du golfe de Gascogne de Hendaye à l'entrée de la Manche.

Dans le cas de celui de la Méditerranée, la profondeur la plus probable est de l'ordre de 120 mètres (Marseille), 150 mètres à Port-Vendres. Mais nous avons dit que le Rebord ne peut nullement être considéré comme une falaise linéaire ayant la forme de la corde de l'arc qui joint Sicié au cap Creus. Il ressemble plutôt à la pente d'un plateau, ourlé de vallées très serrées, séparées par des pédoncules. Entre chaque cañon s'étendent de larges promontoires dont quelques-uns, comme celui entre la vallée de Cassis et celle de la Ciotat a pu être qualifié de « Banc » des Blauquières. Sur ces pédoncules, les « sables roux » ou « sables du large » descendent souvent au-delà de — 200, parfois — 300 et sont progressivement recouverts par une vase bleue.

A l'est du cap Sicié, dès les rades profondes de Toulon et de Cavalaire, le plateau continental est en forte pente. Il présente pourtant lui aussi des cañons sous-marins.

A Nice, aucune forme ne ressemble à un plateau; la pente semble continue et la courbe de 200 est très proche du littoral. Du point de vue des sédiments, la vase bleue méditerranéenne vient presque directement

en contact avec les galets des deltas sous-marins du Var et du Paillon, avec les herbiers sableux à Villefranche. Qu'en conclure? Ou il n'y a pas de plateau, ou, comme il est classique de le dire, il est très étroit? Il y a peut-être une autre réponse, c'est de considérer que les cañons sous-marins sont la marque distinctive du plateau et de rechercher s'ils existent là où il y a une forte pente, dans ce cas tenter d'obtenir les graviers qu'ils doivent renfermer.

Cette hypothèse étant vérifiée à Nice, où le réseau de cañons est particulièrement compliqué, si nous admettons, *a priori*, affirmation qui sera discutée plus bas, que les cañons sous-marins sont dus à une érosion fluviale ancienne, on en tirerait la conclusion que le plateau a partout existé (probablement avec sa couverture de sables graveleux), *mais qu'il a été déformé*, postérieurement à sa création (et à ces cailloutis). Cette déformation est minima à Sète, maxima à Nice. L'intensité de la déformation pourrait être mesurée par l'accentuation de la pente des cañons sous-marins. On admettrait que leur pente initiale est celle d'une rivière comme l'Ardèche.

Une autre question importante est celle de la pluralité des plateaux.

Dans une publication antérieure, basée sur les résultats d'une mission du *Président Théodore Tissier* au Maroc et au Rio-de-Oro, j'ai admis que les traces de deux aplanissements plus profonds existaient parfois.

En 1881, MARION admettait à Marseille un plateau (plateau Marsilli) de 300 à 500 mètres ce qui serait à peu près la profondeur du premier, toujours beaucoup plus incliné (déformé) que le plateau des océanographes. Le second atteindrait la cote 1.000.

L'absence de vase au Maroc méridional à des fonds de — 500, remplacée par des sables à *Cyclamina*, serait en faveur de l'hypothèse d'une pluralité des plateaux.

Le long des cordillères, le plateau, inexistant, serait en réalité plissé, comme il l'est le long du bord espagnol du golfe de Gascogne. La présence sur les hauts fonds de cette région de cailloutis, découverte par le *P.T.T.* est en faveur de cette hypothèse.

THÉORIES EXPLICATIVES DU PLATEAU CONTINENTAL

Une forme aussi remarquable devait forcément entraîner un effort d'explication de la part des océanographes.

Rejetant l'interprétation *ad hoc* de WEGENER, nous avons déjà cité deux types d'hypothèses explicatives : celle de MURRAY qui l'assimile à un delta formé par tous les produits d'érosion du continent et considère son rebord comme un *talus* (d'où l'expression classique de « talus continental ») et celle de RICHTHOFFEN, qui y voit une plaine sculptée dans

le socle continental par l'abrasion marine qui se serait arrêtée au niveau du rebord, la profondeur de — 200 correspondant à la limite effective du pouvoir d'action de la houle.

La première théorie est démentie par la constitution essentiellement rocheuse du plateau, au moins en France et au Maroc : aspérités nombreuses et bancs rocheux, incisures du bord du plateau et parois des cañons sous-marins. La prolifération de coraux buissonnants (*Lophohelia*, *Amphihelia*, *Dendrophyllia* d'après L. JOUBIN), de Bryozoaires et de Brachiopodes sur la « falaise » du golfe du Lion, celles des mêmes organismes sur les parois des cañons sous-marins vivants ou morts, la patine ferro-manganique des roches montrent non seulement qu'il existe un fond rocheux, mais même que des sédiments ne s'y déposent pas. Ces différents arguments seront exposés au cours des diverses descriptions.

La seconde théorie implique qu'une « plate-forme d'abrasion » serait créée par l'action érosive de la mer, essentiellement du ressac, au dépens du continent envahi par la transgression, avec recul progressif de la falaise. D.-W. JOHNSON a tout d'abord indiqué qu'une telle théorie n'est possible que s'il existe une déformation continue du continent. Il est évident que, sans cela, la falaise ne peut indéfiniment reculer. Un profil d'équilibre sorte de radier se constituerait tôt ou tard et annihilerait l'effet d'érosion.

L'étude d'une plate-forme côtière très battue, comme celle de Roscoff dans le Finistère, m'a montré, par ailleurs, que les innombrables îles, îlots ou récifs qui l'accidentent ne sont pas dus à une érosion marine différentielle, laissant subsister les parties les plus dures, mais qu'ils sont le reste d'une topographie continentale, en très grande partie datant d'avant le crétacé, maintes fois exhumée des dépôts marins et réenfouie. Des formations très meubles : sables et graviers pliocènes, argiles bleues, tourbes et surtout limons et *head* se trouvent encore intactes sous les plages et dans les fonds.

V. NOVACK a émis le premier l'idée que le plateau continental n'était qu'une pénéplaine, créée au cours des temps allant du Pontien à l'Actuel. J'ai repris ces idées, mais en considérant que le plateau actuel ne représentait que le biseutage par la décomposition subaérienne d'un relief très ancien, bref ce que les morphologistes français appellent un niveau d'érosion. L'aspect plat serait dû à la combinaison des actions destructives : décomposition chimique, glissements et solifluxion, érosion fluviale et de sédimentation continentale marine.

Le reste du « socle continental » serait conservé sous la forme de deux autres niveaux plus anciens, déformés par la voussure des continents ; le premier se poursuivrait jusqu'à une profondeur de l'ordre de — 500 (des fossiles pliocènes y ont été dragués). Il daterait de la période de régression du pliocène. Le second, jusqu'à une profondeur de l'ordre de — 1.000 dans l'Atlantique, daterait de la fin du miocène (à peu près du pontien).

Admettre l'existence de ces deux plateaux est plausible et commode. Leur recherche systématique peut conduire à abandonner cette hypothèse, mais elle aboutira à mettre en évidence des faits indispensables à la connaissance de l'histoire des océans et des mers. Les résultats pratiques ne sont pas exclus; déjà les chalutiers saintongeais opèrent au ras du rebord de la « falaise continentale ».

Enfin, les sensationnels résultats obtenus grâce au carottier à vide, *vacuum core sampler* de B. KULLENBERG, par H. PETTERSON, mettent en cause à nouveau toute la stratigraphie et même les déformations qu'ont subies continents et plateaux.

LE PLATEAU CONTINENTAL MÉDITERRANÉEN

Les renseignements que nous possédons sur la nature des sédiments de la Méditerranée, sur le plateau continental et au large, sont paradoxalement très réduits. Les premiers, qui concernent l'Adriatique et la Méditerranée orientale, sont dus à NATTERER (*Denkschriften d. KK. Akad. d. Wiss. in Wien*, LIX, p. 103, LX, p. 49, LXI, p. 23) et à l'expédition de la « Pola » (*ibid.* LXXIV, p. 285). Mais c'est essentiellement à l'expédition danoise du « Thor » et à son géologue BÖGGILD que nous devons l'essentiel de nos connaissances sur cette question. Dans l'Atlantique français, DELESSE avait résumé dans une belle carte, tous les résultats des sondages du Service Hydrographique de la Marine. Les recherches poursuivies par le Prince de Monaco ont abouti à la récolte d'une très belle collection, encore inédite, et à la rédaction par THOULET et ses élèves : CHEVALLIER et SUDRY, de cartes lithologiques du littoral français, sur lesquelles sont portées la nature, surtout déterminée par la granulométrie, des fonds sous-marins.

En 1923, une croisière du *Pourquoi-Pas?* sur les plateaux continentaux du sud-est de la France, d'Espagne, d'Oranie et siculo-tunisien, permettait à L. DANGEARD et à L. BERTHOIS d'examiner quelques échantillons de vases.

L'étude de la topographie du plateau a été inaugurée (à l'exception du travail historique de MARSILLI) par A.-F. MARION dans deux remarquables mémoires parus dans les *Annales du Musée d'Histoire Naturelle de Marseille* (1883) : Esquisse d'une topographie zoologique du golfe de Marseille (I), pages 5-108, et Considérations sur les faunes profondes de la Méditerranée, pages 5-50.

MARION les a illustrés d'une très belle carte, sur le fond de la carte marine, mais où sont portés, grâce aux sondages du *Progrès* et du *Travailleur*, les traits principaux du plateau qui, limité par la falaise Peyssonnel, serait suivi par une marche intermédiaire : le plateau Marsilli (350-500). Au large du cap Sicié, une topographie analogue est indiquée. Sur le

plateau marseillais des traits mineurs sont figurés comme la falaise côtière des Mangespen, d'une dizaine de mètres de hauteur qui joint le Planier au cap Croisette. La nature des dépôts est déjà figurée sur cette carte. Un cañon sous-marin est déjà figuré au voisinage de la Cassidagne (Cassis).

Il faut faire une part toute spéciale aux études de détail faites à bord du *Roland* et de l'*Orvet* par Georges PRUVOT, au large du laboratoire Arago de Banyuls-sur-Mer. Ses sondages et dragages ont été nombreux. Outre la récolte et la détermination de la faune, les renseignements les plus précis pour l'époque ont été obtenus sur la nature et les conditions de dépôt des sédiments. En outre, malgré la précarité des moyens dont il disposait, il a pu dresser une carte en courbes du plateau roussillonnais où figurent, pour la première fois, les « rechs », profonds ravins qui entaillent le plateau. Nous reviendrons sur ce travail fondamental.

Peu de temps avant la guerre, le créateur des sondages par écho, l'ingénieur hydrographe MARTI dirigeait une mission dont les résultats longtemps maintenus secrets, m'ont été communiqués en 1948.

Sur la carte qu'il a pu dresser, le plateau continental prend une allure totalement différente de celle que l'on figurait sur les cartes bathymétriques. Il est profondément incisé, du Bec de l'Aigle au cap Béar par des cañons sous-marins, que MARTI limite en haut à la courbe de 150 et qu'il a suivis jusqu'à — 2.000. Aucun ne semble correspondre à une rivière actuelle. Perpendiculaires, dans l'ensemble, à la corde de l'arc du golfe qui joint Sicié au cap Creus, ils sont séparés par des pédoncules relativement étroits. A leur tête, ils reçoivent, en général, plusieurs affluents.

Les sondages de MARTI étaient ponctuels et suivaient des alignements arbitraires. Dans l'essai de cartographie détaillée que nous avons tenté du rech Lacaze-Duthiers, le cañon qui se développe au large de Port-Vendres et de Banyuls-sur-Mer, nous avons pourtant pu utiliser la plupart de ces points.

Ajoutons que, en 1950, à bord du *Skagerak*, PETERSSON, avec son nouvel appareil de sondage à piston, a obtenu des carottes de 15 mètres, ouvrant ainsi la voie en Méditerranée à l'étude de la succession stratigraphique de dépôts de mer profonde qui révolutionnera certainement la géologie des époques récentes. Mais les boudins prélevés par PETERSSON ou ceux que l'on obtiendra avec des méthodes analogues, resteront rares et leur description nécessitera une très nombreuse équipe de spécialistes. Elle ne nous dispensera pas d'une étude de la variation des dépôts en surface, que bien des raisons (détermination des zones « fertiles » au point de vue des pêches maritimes, corrosion des câbles, etc...) justifient amplement, sans compter la nécessité de comparaisons avec les sédiments mieux connus de la Manche et de l'Océan.

J'ai donc entrepris ce travail le long du littoral français, avec les moyens qui m'étaient fournis, tant par la Marine Nationale (Comité

d'Océanographie et d'Études des Côtes), que par le Laboratoire de Banyuls-sur-Mer et le Musée Océanographique de Monaco. Elle sera longue et je ne veux en donner ici que les premiers résultats pour la région au large de Banyuls. Je la comparerai aux résultats obtenus à Nice et à Villefranche et au cours d'une traversée Marseille-Ajaccio où quelques échantillons ont été prélevés, et aussi à quelques échantillons de l'Atlantique.

SÉDIMENTS DU PLATEAU CONTINENTAL MÉDITERRANÉEN

Dans une première partie, les sédiments recueillis seront étudiés et comparés entre eux. Dans la seconde les formes caractéristiques du plateau, leur nature et les roches dans lesquelles elles sont sculptées, enfin les théories explicatives possibles seront examinées.

D'après BÖGGILD, les sédiments méditerranéens du large présentent une très grande uniformité : ce sont essentiellement des « vases » à *globigérines*, recueillies entre — 240 m et — 3.200 m, et des *vases bleues* prélevées entre — 400 m et 2.000 m. La répartition de ces deux types de sédiment (qui se distingueraient essentiellement par leur teneur en calcaire : < 30 % pour les vases bleues, > 30 % pour les vases à *globigérines*) paraît absolument hasardeuse et ne dépendre, ni de la distance à la côte, ni de la profondeur. BÖGGILD reconnaît l'impossibilité de trouver une loi expliquant la répartition de la fraction « argile » (1), de ces deux vases, celle-ci ne diminuerait ni avec la profondeur, ni avec la distance à la côte, comme il est classique de le dire. Les points étudiés par cette expédition en dessous de 4.000 mètres sont très rares.

THOULET et ses élèves distinguent, sur le plateau continental, des fonds de *graviers* ou de *galets*, de *sables* (très importants le long du littoral à partir du golfe de Fos jusqu'aux Albères, très fins dans la rade d'Hyères), de *sables roux* sur le « promontoire » sous-marin du cap Sicié (la découverte de ce type de sable appartient à PRUVOT), de *vases sableuses* ou de *sables vaseux*, enfin de coquilles mortes. Dans sa très belle étude des fonds sous-marins de la région de Banyuls, Georges PRUVOT distingue :

- 1° Les *dépôts littoraux* : graviers, sables, herbiers à Posidonies;
- 2° Les fonds de *roche* submergée;
- 3° La *vase côtière*;
- 4° Les *sables et graviers du large*, parfois agglutinés et rocheux (sic), mélangés ou non de vase côtière ou de vase profonde (ce sont les sables roux des cartes marines et de THOULET);
- 5° La *vase profonde*.

(1) Au sens granulométrique.

Enfin des dépôts de coquilles (coquilles « siciliennes » ou bancs d'huîtres mortes).

Les deux types de vase auraient la composition des « marnes » des géologues : « silicates d'alumine ferrugineux renfermant du carbonate de chaux, un peu de carbonate de magnésie et des matières organiques et mélangés à une certaine quantité de sable fin. » Les *vases profondes* se distingueraient des *vases côtières* par une plus grande richesse en $\text{CO}^3 \text{Ca}$ et une pauvreté relative en matière organique, les « éléments minéraux figurés qu'elles renferment sont sensiblement plus volumineux, contrairement à ce qu'on peut attendre ».

Ces éléments figurés, les mêmes partout, sont ceux qui sont enlevés aux rivages, mais le mica semble manquer dans les vases profondes.

La très grande nouveauté qu'apporte le travail de PRUVOT est l'existence d'une bande de « sables du large » séparant les deux types de vase. Il en est d'ailleurs de même, déjà d'après les cartes marines, sur le plateau continental atlantique où les vases de la Grande Vasière sont séparées des « boues bleues » du large par une bande sableuse (sables roux entre — 100 et — 200).

1° La signification de cette bande de sables, qui avait déjà été observée par DELESSE, est un des problèmes les plus importants que pose la répartition des sédiments dans le golfe de Gascogne. L'analogie de cette distribution dans deux mers si différentes rend encore plus nécessaire la recherche de la solution de ce problème. PRUVOT remarque que l'abondance des concrétions manganésifères et ferrugineuses, cimentant des débris minéraux et animaux au bord le plus au large du plateau, impliquerait « un repos actuel des eaux qui contraste avec l'aspect roulé des éléments, les courants actuels étant manifestement incapables de transporter au loin des matériaux relativement lourds et volumineux comme ceux des sables et graviers qui forment tout le plateau continental, il faudrait admettre que la formation du plateau doit remonter à une époque antérieure à l'époque actuelle. Les puissants cours d'eau de l'époque « diluvienne » ont charrié à la mer les matériaux arrachés aux régions qu'ils traversaient. Ceux-ci ont comblé le fond du golfe primitif qui est devenu la plaine du Roussillon et ont formé plus au large, sous les eaux plus profondes, le plateau continental actuel, qui en est la formation directe » (*op. cit.*, p. 668).

2° Les vases côtières seraient dues à l'apport des rivières actuelles « restes dégénérés des violents torrents quaternaires ». Cette vase n'atteint jamais le rebord du plateau.

3° La *vase profonde* a la même origine terrigène que la vase côtière, mais ne pouvant, car elle en est séparée jusqu'à Marseille par la bande de sable, provenir du Roussillon ou de la zone plus au nord, elle aurait pour PRUVOT, une origine méridionale (?).

Les courants dans cette partie de la Méditerranée auraient donc d'abord été nord-ouest—sud-est, transportant les sables (au quaternaire), puis, actuellement, ils seraient essentiellement sud-ouest—nord-est.

Aucune carte marine des courants actuels n'existant, cette hypothèse ne peut se discuter. Plusieurs autres explications peuvent être recherchées, dont l'une serait d'admettre qu'une zone d'agitation maxima existerait au niveau de la bande sableuse.

Il est donc nécessaire d'examiner de plus près la nature des sédiments de façon à mieux poser le problème avant que des mesures directes soient entreprises pour connaître la direction et surtout la force vive des courants de fond. Je décrirai d'abord les caractéristiques des sédiments de la région de Banyuls, les uns récoltés avant la guerre avec les embarcations du laboratoire, les autres à bord du dragueur de mines 333.

SÉDIMENTS DE LA RÉGION DE BANYULS

(Pl. I et *tableau hors texte*)

Constitution géologique du littoral

La région est constituée par la terminaison des Pyrénées qui constitue la chaîne des Albères de la mer au col du Perthus, puis du Roc de France, limitée vers l'Espagne par le bassin de Lampurdan, vers la France par le bassin du Roussillon compris entre le Canigou (2.700 m) à l'Ouest, massif ovalaire primitif à cœur gneissique et granitique, mais de soulèvement récent, la chaîne, essentiellement crétacée des Corbières et le massif granitique de Millas-Quérigut. Le Roussillon, bassin contenant une épaisse série (1.000 mètres environ) de pliocène et peut être de miocène supérieur comme la Cerdagne et les autres bassins espagnols, prononce trois apophyses vers la montagne qui sont : le Vallespir au Sud, le Conflent et, au Nord, le Fenouillet. Ces trois dépressions sont divisées par les trois grands fleuves côtiers : Tech, Têt et Agly.

La série stratigraphique des Albères comprend :

1° Des granites à biotite, Llobregat espagnol, massif du Roc de France (ils sont probablement d'âge carbonifère et responsables du métamorphisme);

2° Des gneiss (Sorède) et des micaschistes (Pic de l'Homme Mort) qui représentent vraisemblablement la base métamorphisée du primaire;

3° Les schistes et quartzites de Banyuls, quelquefois intercalés de calcaire, très plissotés. C'était à l'origine des alternances de vases et de lentilles de sables grossiers. Léon BERTRAND les attribue au cambrien, O. MENGEL au gothlandien;

4° Schistes de Laroque et de Cerbère (Tzemada);

5° Schistes du Llandeilo du synclinal de Céret-Amélie recouverts probablement par le calcaire du Caradoc qui enveloppe le Canigou. Cette série primaire est recouverte en discordance, par la série du synclinal pincé de Céret-Amélie;

6° Grès rouges du trias inférieur;

7° Calcaires gris et en plaquettes du Muschelkalk (trias moyen) recouverts en discordance par :

8° Les grès à pavés (oligocène continental) du Boulou.

La stratigraphie du Canigou n'est pas essentiellement différente, mais des termes plus récents de la série primaire y sont conservés sur des gneiss et micaschistes, métamorphisés par le granite; sur un ordovicien schisteux et un gothlandien de schistes noirs, se montre une série dévonienne essentiellement calcaire (gédinien : calcaires noirs, coblentzien : calcaires et marbres roses, eifélien : calcaire silicifié et phtanites, givétien : calcaires pyriteux, frasnien : marbre griotte rouge, faménien : griotte gris) et un carbonifère à faciès profond : schistes conglomérats et lydiennes. Le trias est classique : schisteux rouge à la base, muschelkalk calcaire, marnes irisées.

La série des Corbières qui est directement transgressive sur le granite ou n'importe quel terme du primaire, se compose de trias, de lias d'abord calcaire (gris ou dolomitique) puis marneux, de jurassique dolomitique; tous ces terrains occupant des affleurements réduits. La plus grande surface est occupée par les calcaires clairs épais de l'urgo-aptien qui forment un véritable causse recouvert par les grès rouges et les marnes du gargasien, enfin par le gault, calcaire à la base, avec un niveau important au-dessus de schistes noirs.

Le crétacé supérieur et l'éocène n'existent qu'en lambeaux : cénomaniens marneux, sénonien calcaire et gréseux, éocène supérieur calcaro-gréseux, nummulitique calcaro-gréseux.

Le miocène calcaire d'eau douce, molasses et marnes, occupe dans la région des synclinaux dont celui de Leucate.

Le remplissage du Roussillon est constitué à la base par des argiles rutilantes à esquilles de roches locales et des sables arkosiques (rhodanien), puis par les vases marines du pliocène, équivalentes exactes des vases côtières actuelles, enfin par une très épaisse série de limons, calcaires et sables de l'astien qui se termine par des cailloutis et sables rouges du villafranchien (époque importante d'érosion) rarement conservés sauf comme cailloutis résiduels de quartz éclatés et guillochés par le vent. La série pliocène, qui recouvre peut-être le miocène, est épaisse d'au moins 1.000 mètres dans le centre du bassin (sondage de Pontella). Elle a pénétré dans toutes les grandes vallées déjà existantes. Le rhodanien a même été retrouvé dans la vallée de la Ballorise (Banyuls).

Les vallées ont été recreusées au quaternaire. Celui-ci comprend un quaternaire ancien, grès de plage et dunes cimentées, homologue de celui des roches Notre-Dame-d'Agde, de Bandol, des îles d'Hyères, du cap Ferrat et de Monaco, probablement de tout le quaternaire de la Méditerranée et des couches lagunaires, contemporaines des alluvions anciennes : cailloutis très grossiers, empâtés de sables et d'argiles rouges

(époque de régression, de pentes accentuées et d'érosion : acheuléo-moustiérien probable), enfin des vases sableuses récentes (invasion marine de la Salanque et de la région de Saint-Nazaire) correspondant peut-être à la transgression (« versilienne » des Italiens).

La région a été plusieurs fois plissée : plissements hercyniens (en deux étapes probablement avant le stéphanien et après le permien), aux deux grands moments de l'orogénèse pyrénéo-provençale : avant le cénomanien et avant l'oligocène. D'importants mouvements se sont produits dans ce bâti : au début du miocène (aquitaniens) à la fin de cette époque (création du bassin « pontien » de la Cerdagne) et avant le plai-sancien. La surrection de la chaîne date du pliocène supérieur (villafran-chien, époque de grande régression) avec une nouvelle crise à l'acheuléo-moustiérien). On peut ainsi schématiser ce que l'on sait du quaternaire. Plio-quaternaire (sicilien?), pas de dépôts, climat excessif, actions éoliennes considérables, altération et remaniement des cailloutis villa-franchiens des plateaux.

Transgression marine du quaternaire ancien dont le littoral bas et plat avec étang allait d'Agde à Leucate, gonflement et régression profonde à l'époque rouge de l'acheuléo-moustiérien, détente et transgression marine au début de l'holocène (versilien? de la Salanque).

Le littoral actuel est constitué par un cordon de sable grossier puis graveleux, avec en arrière quelques dunes, s'appuyant sur l'île rocheuse de Leucate jusqu'aux Albères. Il isole de la mer les étangs de Leucate, Saint-Nazaire, reste d'une beaucoup plus grande étendue lagunaire : Salanque, bas pays d'Elne où les villages : Cannet, Saint-Nazaire, Corneilla-del-Vercol, La Tour-bas-Elne restent sur des collines de limons pliocènes.

A la plage du Rastoul, le cordon s'appuie sur les alluvions rouges acheuléo-moustiériennes du Tech qui revêtent les schistes des Albères.

Les étangs communiquent mal avec la mer par des « graus » ; les embouchures des fleuves côtiers, sans cesse changeantes, se font à travers des perforations analogues du cordon littoral.

A ce littoral de type languedocien s'oppose la côte escarpée des Albères, uniquement schisteuse. Les sommets (culminant pic Sailfort : 994 mètres, à moins de 10 kilomètres de Banyuls) sont très rapprochés du littoral. La chaîne a été découpée en grands cirques (cirque de Collioure-Port-Vendres, Paulilles, Banyuls, Peyrefite et Cerbère), eux-mêmes recoupés en dessous d'un premier niveau d'érosion à terre rouge et cailloutis roulés par des cirques secondaires très récents (les éperons portent des sols châtaîns).

(1) PRUVOT et ROBERT (*op. cit.*) considéraient comme sicilienne la faune froide conservée dans les graviers du cap Creus et des rechs. Nous pensons qu'elle est beaucoup plus récente. Cette opinion sera discutée plus bas.

Les vallées se terminent en rias ou calanques, souvent barrées par des cordons littoraux faits d'alluvions qui étaient submergées; en arrière, elles sont comblées. La ria de Port-Vendres a été artificiellement déblayée.

Les rivières des rias ne coulent qu'en crue d'orage amenant à la mer des boues pierreuses.

La côte est escarpée, biseauté aux pointes par de grands décollements et éboulements dont les traces subsistent souvent (notamment à la pointe Landien de Banyuls). Ces éboulements s'expliquent par l'extrême pourriture des schistes et la rareté des affleurements gréseux lenticulaires qui restent en saillie.

Du point de vue océanographique, le vent dominant est la tramontane (N.-N.-W.) le vent de pluie celui d'Est. Un conflit entre les deux vents amène la brusque pluviosité et les crues catastrophiques comme celle d'octobre 1940 qui ont transporté des blocs de 1 m³ en Roussillon. La tempête se produit par vents d'Est ou de Sud-Est.

Il semble qu'un courant général se fasse du Nord vers le Sud (parfois inversé) avec de grands tourbillons dans les baies, tournant en sens inverse des aiguilles d'une montre.

Le cap Creus représente une limite météorologique et océanographique importante. Les produits véhiculés par les crues sont flottés en mer pendant des dizaines de milles, comme par exemple les rhizomes d'*Arundo donax* (la « canne » de Provence) que l'on drague partout.

Nature des sédiments

On peut distinguer plusieurs catégories de sédiments :

1° *Les sédiments de la zone littorale* (jusqu'à 30 mètres environ) qui semblent actuels;

2° *Les graviers et sables côtiers à Amphioxus* (30 à 40 mètres, très localisés, triés, arrondis, patinés de jaune;

3° *Les vases côtières* de 40 à 90 mètres environ;

4° *Les sables roux et gravières du large*, avec coquilles altérées, perforées, grisâtres et moules glauconieux;

5° *La vase profonde*, vase des rechs et vase bleue gluante du pied du rebord continental (1).

A. — Zone littorale

Dans la région des Albères, les pointes de schistes, à relief aigu se projettent parfois de plus d'un demi mille vers le large, bordées du classique trottoir d'algues calcaires. Entre ces pointes, on drague essentiellement du *sable* qui, dans les anses et rias, succède immédiatement au cordon littoral ou à la grève de tempête dont la base est légèrement au-dessus du niveau moyen des mers. Cette bande de sables qui s'étend jusqu'à

(1) La description des sédiments est donnée dans le tableau de la p. 524.

— 30 mètres environ est relativement fortement inclinée (talus pré littoral). Un sondage continu exécuté entre le port de Banyuls et le large indique une brusque diminution de la pente à leur pied (sables à *Amphioxus* ou vase), c'est-à-dire au début de la zone côtière. L'allure générale, aux pointes de rochers près, est celle d'un « lit de déjection », confluent du produit de tous les apports de crue des rivières côtières.

La zone entièrement sableuse qui fait suite au cordon littoral roussillonnais est exactement analogue.

Le sable littoral des Albères avait déjà été étudié par DELESSE qui, à la calanque de Peyrefite, immédiatement au sud de Banyuls, y avait reconnu :

Quartz hyalin anguleux (granitique)...	31,1 %
Quartz hyalin gris ou noir arrondi ...	44,4 %
Micaschiste à séricite roulé	8,3 %
Schiste micacé arrondi	1,7 %
Schiste feldspathique arrondi	5,7 %
Gneiss arrondi	8,2 %
Débris de coquilles	0,6 %

M^{lle} Claude LALOU a repris l'étude de ces sables dont on trouvera les caractéristiques publiées dans cette revue. Ce sont des sables grossiers anguleux, qui, à Argelès, sont absolument privés d'éléments marins. Ceux-ci sont représentés par quelques débris d'Échinides et quelques Foraminifères flottés du genre *Rotalia* sur la grève de Banyuls. Ils sont plus fins et plus micacés au Canet.

Ces sables contiennent exclusivement les minéraux et les roches du cadre montagneux des Albères, sans sablon (fraction de 0,1-2 mm), sans poudre et presque sans éléments marins. La dimension des grains varie entre 0,5 (parfois 1 mm) et 0,2 mm; leur forme est extrêmement anguleuse, à la faible exception de quelques grains roulés, recouverts alors d'une pellicule de Fe^2O^3 .

Ce sont de fins sables fluviatiles, apportés en suspension par les crues de la Têt, du Tech, de la Massane ou des autres torrents des Albères. Ils se différencient complètement des sables des rives de l'Agly, de la Têt et du Tech par l'absence totale de la fraction *limon* (essentiellement formés de quartz plus petit que 0,1 mm et d'hydroxyde de fer, qui caractérise les dépôts d'inondation des fleuves à régime variable). La fraction sable proprement dite, reste sur le littoral, tandis que les sablons et les poudres, associés aux phases colloïdales ou précolloïdales, sont entraînés vers la mer.

Le vent trie enfin ces matériaux et les rassemble en dunes en arrière, de la plage.

Le littoral du Roussillon, comme celui du Languedoc, est bordé d'étangs. Saint-Cyprien et Leucate, communiquant difficilement avec la mer par des *graus* plus ou moins bouchés par le sable apporté par la

houle et le vent. Leur salinité, variable de la rive continentale à la rive vers la mer et au cours de la saison, est toujours inférieure à la normale. Ils sont séparés de la mer par un cordon littoral de sables, graviers et galets qui se soude au premier cordon par une zone de sable et galets à topographie confuse ou dunaire. La face vers l'étang du cordon est envasée.

Le bord du côté de la terre est formé, sans que l'on puisse y distinguer de marches d'escalier comme au mont Saint-Michel ou dans les estuaires vaseux :

1° D'une roselière à *Phragmites*;

2° D'un schorre à Salicornes et autres halophyles avec taches de vase oxydée et polygonée;

3° D'une *slikke* à *Rippia maritima* avec des étendues importantes de vase noire, fine, gluante, très riche en humus, en Si O² et en sulfure de fer attaquable à H Cl dilué. En outre, on y relève une grande quantité de chlorophylle. *Syndesmia ovata* (en aval), *Cardium edule* (en amont surtout) y abondent.

Sous la mer, à partir de 10 mètres de profondeur, les sable littoraux sont recouverts d'herbiers.

B. — Zone côtière

I. Sables à *Amphioxus*.

Vers le large, une transition assez régulière se fait le plus souvent entre les sables littoraux et les sables fins des herbiers à Posidonies et de véritables vases. Mais au large du cap Oullestrel, dans la partie nord de la baie de Paulille, et contre le cap La Beye (l'Abeille de la carte), au sud de la baie de Banyuls, le sable dans les fonds de — 50 à —40 mètres, très grossier riche en galets de schistes et en gravier quartzeux, est mêlé parfois, aux trois-quarts, de débris de coquilles très roulés, ou de test d'Échinides peu reconnaissables, très fortement patinés en jaune brun par de l'oxyde de fer, avec des tests d'*Echinocyamus pusillus*, des spicules d'Éponges et d'Holothuries et de nombreux tubes de *Ditrupe arietina*. *Nucula nucleus*, *Venus ovata*, de petits *Cardium* (voir tableau I). Les coquilles mortes de Gastéropodes caractéristiques des zones à *Cystoseira* et du trottoir y sont aussi extrêmement nombreuses ainsi que les *Rotalia* et de très nombreux débris de Bryozoaires.

La patine jaune de ces coquilles pose un problème délicat à résoudre. Elle s'oppose à première vue à la patine noire des coquilles mortes des vases côtières (sulfure de fer), mais toutes nos observations en mer du Nord, Manche et Atlantique montrent qu'elle provient de l'oxydation de celle-ci. On trouve, en effet, très fréquemment, des coquilles dont la moitié engagée est encore noire, la partie supérieure jaune.

Le caractère très grossier de ces sables pour une profondeur (— 30), où les courants sont très faibles, l'absence de sablon et de vase, enfin

leur arrondissement très poussé, leur triage presque parfait (voir tableau I, éch. C43) semblerait devoir en faire une formation continentale (de régression) très remaniée par la mer en transgression. Si la patine ferrique provient de l'oxydation de la patine sulfoferrique, il faut, en outre, nécessairement supposer que les débris des coquilles très roulés ont préalablement séjourné dans la vase et que celle-ci, ensuite, aurait été enlevée peut-être après émerision.

Nous avons vu (p. 52) qu'un sondage continu entre le port de Banyuls et le large nous a montré que la zone pré littorale est séparée de la zone côtière par une rupture de pente très nette. Sur le littoral du Roussillon, comme sur celui de Camargue ou des Maures, elle est façonnée par la houle du large en cordons et ridens (mot de la mer du Nord). Ceux-ci sont parfois au nombre de cinq ou six dont le cordon littoral émergé. Le vent de terre démolit les cordons. La houle du large creuse celui qui est émergé de *beach cusps*.

On drague dans les sables à *Amphioxus* en abondance des coquilles, qui vivantes sont rares et semble-t-il vasicoles ou de sables vaseux : *Lutraria lutraria*, *Isocardia cor*, *Laevicardium oblongum*, *Cardium echinatum*, *Venus verrucosa*.

Signalons, en bordure de ces fonds, des concrétions en choux-fleurs à *Lithothamnium incrustans* et nombreuses Serpules. Les sables à *Amphioxus* ne contiennent ni glauconie, ni graviers calcaires dépolis allochtones.

Le passage entre les sables fins des herbiers à Posidonies, les sables à *Amphioxus* et la vase côtière se fait par l'intermédiaire d'une bande, en général assez étroite de *sables vaseux*. Ceux-ci peuvent exister, d'ailleurs par taches dans le sein même de la zone des vases côtières jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 70 mètres.

Nous avons vu plus haut que la coupure entre sables vaseux et vases sableuses ne peut être déterminée arbitrairement. Nous considérons au laboratoire que les sables vaseux sont une formation qui reste granulaire sous l'eau sans cohésion propre. Sa perméabilité est celle des sables ($K = n \cdot 10^{-3}$ à 10^{-4}).

Un brusque changement de ce coefficient de perméabilité, l'apparition d'une cohésion vraie (le C de la formule de Coulomb) sous l'eau n'apparaît que pour un certain dosage de vase. Ce brusque saut dans les propriétés caractérise les vases appelées sableuses. Le tamisage ou même le contact des doigts, y fait percevoir les grains de sable ou de gravier, mais la vase reste un ensemble *continu* où les grains sont réunis par un liant formé de poudre minérale et de colloïdes : Fe S, Fe S², humus, tandis que, dans le cas des sables vaseux le même liant revêt simplement les grains du sable, mais il laisse subsister les canaux intergranulaires, qui caractérisent les matériaux sableux. La pénétration des sables par les racines ou par les animaux fouisseurs est d'autant plus facile que la fraction vaseuse

est plus réduite, mais elle est toujours difficile à mesurer au laboratoire (1), les sables vaseux se séparant pendant le transport en deux fractions, sables et vases.

Ajoutons que seuls les sables, et jamais les vases, peuvent former des ripple-marks. Dans la région du cap Creus, où les courants superficiels portant à la terre sont très violents et par conséquent les courants profonds, de compensation, des vases côtières ne viennent pas s'interposer entre les sables côtiers de compensation et les sables du large. On passe directement de l'un à l'autre.

Remarquons que dans les « étangs » : Lapalme, Leucate et Saint-Nazaire, ce sont des vases peu sableuses riches en sablon, qui se déposent.

2. Vases côtières.

La vase côtière se dépose de 0 à 30 mètres jusqu'à 90 mètres sur le plateau continental. Elle est de couleur gris sombre vers la terre, presque beige clair vers le large, parfois bleu-vert, avec une odeur caractéristique d'algues et jamais d' H^2S (2). Séchée, elle devient d'un gris très clair, presque blanc. Son contenu en sable peut souvent être assez élevé (voir tableau II) ou même en coquilles brisées et en fin gravier. Comme toute vase, elle est rigide, thixotropique et, en moyenne, contient 200 % d'eau. La séparation entre sable, sablon d'une part et d'autre part poudre et colloïdes est très facile, surtout à l'eau douce, soit à la battée, soit au tamis 350. On isole d'une part le *squelette minéral* (gravier, sable, sablon) qui peut atteindre 45 % et même 70 % s'il s'agit uniquement de coquilles, d'autre part les poudres et la partie active.

La fraction « gravier » de la vase est essentiellement faite de granules de quartz de filon, bien roulés et fortement teintés en brun, de schistes micacés ou sériciteux en disques plats, beaucoup plus rarement de granite, enfin, à partir d'une certaine profondeur, de graviers ou de grains calcaires gris ou bruns et de coquilles et de débris de coquilles patinées de noir. Cette patine noir des coquilles mortes extraites de la vase est très générale sur les côtes de France. Souvent comme il a été dit, elles sont oxydées dans la partie qui émerge, virent au roux (Fe^2O^3). Ces coquilles patinées, dans la Manche, la mer du Nord et l'Atlantique, sont parfois rejetées sur les plages (elles sont notamment très abondantes sur le cordon de Cher-rueix en baie du mont Saint-Michel). Dans ce cas, elles peuvent contenir (*Ostrea edulis*) jusqu'à 10 % de SO^4Ca .

La transformation de la patine noire en patine ocre (celles des sables littoraux) semble se produire facilement par oxydation quand la vase réductrice a été enlevée mais l'inverse semble plus difficile ou plus lent.

(1) Voir les travaux de M. M. PRENANT.

(2) La vase des vieux bidons ou épaves chalutés est noire avec une forte odeur d' H^2S .

Les vases contiennent en effet, toujours encore un certain pourcentage de coquilles rousses et beaucoup de celles de leur substratum plus ancien, gardent cette couleur.

La patine formant un vernis absolument continu, elle semble avoir été déposée à l'état colloïdal. Elle pénètre, comme d'ailleurs la patine jaune, profondément dans les pores, L. DANGEARD et L. BERTHOIS ont étudié cette pénétration en coupes minces.

Parmi les coquilles mortes, vers 50 mètres, on recueille à Banyuls dans la vase, comme dans les sables à *Amphioxus*, des valves isolées de *Cardium oblongum*, *Lutraria lutraria* et *Isocardia cor*. Ces deux dernières espèces semblent être rares à l'état vivant dans la région.

Dans la fraction sableuse domine le quartz granitique presque toujours recouvert d'une pellicule jaune d'or de $Fe^2 O^3$, plus rarement, et vers le large, d'une pellicule vert-jaune qui pourrait être de la glauconie. Elle est transformable à la flamme oxydante en $Fe^2 O^3$, souvent aussi le quartz est fortement sali de poussière calcaire. L'élément à la dimension des sables qui est ensuite le plus abondant est la biotite. Celle-ci est rarement normale, c'est-à-dire brune. Le plus souvent, elle est d'un vert pâle et présente une très faible biréfringence. Ces biotites « décolorées » — il arrive en effet que certaines lamelles gardent encore une partie normalement colorée — ont été signalées par de très nombreux auteurs : MURRAY, THOULET, DELESSE, PRUVOT, CAROZZI, etc... Elles sont identiques à la plupart des phyllites des marnes.

Entre les lamelles de clivage des biotites décolorées, on observe parfois des cristaux isotropes, bruns, cubiques, donnant les réactions du fer.

La muscovite est rare, elle est absolument inaltérée; l'amphibole verte assez fréquente, quelquefois 0,2 % des minéraux du champ de l'objectif 3.

L'orthose — ou les autres feldspaths alcalins — sont aussi très rares et, à partir d'une certaine distance des côtes, manquent complètement. Les débris de plagioclases ont à peu près la fréquence de l'amphibole.

Les grains de roches calcaires sont évidemment peu nombreux dans ce pays uniquement schisteux ou cristallin; la fraction calcaire est formée surtout de coquilles de Lamellibranches, de Bryozoaires, d'Échinides (tests ou piquants); les Foraminifères y sont d'autant plus abondants que l'on va vers le large. Les fragments de coquilles sont presque toujours perforés par les Champignons (?) avec leurs ampoules caractéristiques, qu'a décrits l'abbé FRÉMY. Ceux-ci attaquent très rarement les Bryozoaires et les spicules d'Éponges calcaires, jamais à ma connaissance les Foraminifères ou les débris d'Échinodermes (Échinides, Ophiures, Comatules). Les débris calcaires sont teintés en noir par le sulfure de fer; parfois patinés d'ocre (voir plus haut), ils sont nets et sans recouvrement de poudre.

De très nombreuses sphérules ou ovoïdes formées de sablon agglutinés surtout calcaires ou des tubes cylindriques (1) de même constitution forment un élément important de la fraction sableuse qui disparaît si les sables sont soumis sous l'eau à une trituration. Les sphérules ou ovoïdes, déjà signalées par PRUVOT semblent être des excréments d'Échinodermes, peut-être d'*Echinocyamus pusillus*, les tubes cylindriques beaucoup plus fragiles, seraient des tortillons d'Annélides pélophages.

La fraction sablon est essentiellement faite de quartz, en éclats très aigus, de paillettes de biotite décolorée et aussi de minéraux lourds (parmi lesquels dominent rutile, zircon et grenat) et de rares rhomboédres de $\text{CO}^3 \text{Ca}$ ou $\text{CO}^3 \text{Mg}$.

A ces éléments d'origine minérale, se joignent des Diatomées jusqu'à 200 mètres, des spicules d'Éponges siliceuses ou calcaires (souvent perforés de champignons), d'Holothuries et d'Alcyonnaires des prismes de nacre (*Pinna*).

La fraction poudre, à peu près exclusivement calcaire, est faite de lamelles de calcite de 1 à 2 millimètres qui sont plutôt des débris de coquilles dus à la pulvérisation par les végétaux perforants, que du $\text{CO}^3 \text{Ca}$ de précipitation. Un peu de biotite décolorée et, peut-être des « minéraux de l'argile », s'y mêlent ainsi qu'en plus ou moins grande quantité des Cocolites. Cette poudre est teintée en gris par de l'humus et du sulfure de fer.

Des Foraminifères, des cellules calcaires sphériques (qui sont peut-être des algues monocellulaires), existent jusqu'à ces dimensions.

Le sulfure de fer (Fe S) est directement observable dans les vases sous forme de granules sphériques noires de quelques μ , particulièrement faciles à observer dans les valves de Diatomées. Ils prennent parfois des formes cubiques qui semblent indiquer leur évolution vers la pyrite Fe S^2 . La présence du sulfure noir est inconciliable avec celle de la glauconie. Celle-ci ne manque pourtant pas dès — 70 mètres, sous forme de moules des divers organismes et de perforation de coquilles. Dans ce cas, on constate, le verdissement ou le brunissement des quartz, l'abondance des coquilles micro-perforées de couleur gris saumon (avec les perforations remplies de glauconie), la présence de graviers bien polis de différents calcaires (notamment d'urgonien, de cénomaniens) d'une curieuse roche entièrement formée de glauconie, enfin de débris roulés

(1) *Report of the Scientific results of H.-M.-S. CHALLENGER : Deep Sea Deposits*, p. 101, échantillon de vase bleue.

Voir aussi P.-D. TRASK. Des sables entièrement faits de ces corpuscules existent au large de l'A.O.F.

Ces coprolites, très caractéristiques quand il s'agit de Mollusques ont été signalés par MURRAY.

de grès à *Rotalia*, *Amphiroa* (Corallinacée) à ciment de calcite (quaternaire ancien probable), bref des éléments des *sables du large*. Il semble que la vase qui alors est d'une couleur verte, voire beige, ait été pénétrée par des eaux chargées d'oxygène.

On peut donc, au microscope, séparer une fraction d'origine minérale et biologique *terrigène* et une fraction d'origine biologique *planctonique*.

Du point de vue chimique, l'élément détritique est essentiellement siliceux et silico-alumineux, mais les poudres calcaires dominent largement variant de 16 à 46 % (moyenne 29,35 (1)). La matière organique calculée comme la moitié de la perte au feu, carbonates enlevés, varie entre 6,7 % (au large) et 0,7 % près de la côte (moyenne 1,99 %) (vase de la Penzé : entre 2,36 et 4,15; de la Gironde 4,90; de la Loire entre 1,53 et 7,91, du Bou-Regreg entre 4,10 et 4,12 (2)).

L'humus, dosé colorimétriquement (3), varie entre 0,03 et 0,19 % (moyenne avant 80 mètres : 0,05; à 80-90 mètres : 0,195 %). La teneur en azote varie de 0,075 % à 0,1 (moyenne : 0,156), ce qui donne des rapports C/N de 1,30 à 30, donc très variable. Le fer total varie de 1,54 % à 4,3 % (moyenne : 2,27 %). La pyrite (Fe S^2) de 0,0685 à 0,24 % (moyenne : 0,11 %).

Les teneurs de ces différents éléments ont été portées en courbes suivant la méthode employée par G. NEEB pour les sédiments dragués par le *Snellius*, mais le tracé de ces courbes est ici beaucoup plus complexe.

En traitant les vases par une solution de Na OH à 5 %, on peut en extraire de la silice (entre 0,64 et 0,72 %, moyenne : 0,69) et de l'alumine (entre 0,51 et 0,68 %, moyenne : 0,59 %). Il semble bien qu'il s'agisse, au moins en partie, de silice libre, en partie d'opale provenant des frustules de Diatomées et des spicules d'Éponges et aussi d'alumine libre. La question de la provenance de cette alumine (décomposition des phylites ou des feldspaths) reste irrésolue. Si ces deux corps existent réellement dans la vase, ils peuvent évidemment se recombinaisonner.

La vase côtière est gluante à la récolte, très plastique et forme facilement des billes en la pétrissant; elles deviennent solides par dessèchement ce qui est impossible avec des sables vaseux.

3. *Sables du large*.

Les éléments des sables du large ne sont pas très différents de ceux de la partie profonde des vases côtières ou des vases du large. Tout d'abord, ils renferment un pourcentage assez élevé de petits graviers (dès le sondage 8). Ce sont surtout des quartz de filon de 4 à 6 millimètres

(1) Les chiffres indiquent uniquement la composition de la phase vase passant au tamis de 350, abstraction faite des éléments du squelette. La teneur totale en calcaire peut atteindre 64 % (moyenne 52 %).

(2) in Cl. FRANCIS-BŒUF.

(3) A partir d'un test provenant de terre de bruyère.

très arrondis et polis, recouverts d'une patine ocre de $\text{Fe}^2 \text{O}^3$, des plaquettes de grès verts glauconieux souvent altérés (la glauconie est partiellement transformée en $\text{Fe}^2 \text{O}^3$) et quelques éléments très roulés de calcaire blanc à Alvéolines, de rares fragments de schistes. Des coquilles ou des fragments de coquilles (d'aspect terne et de couleur chamois) ou gris saumon sont perforés par des Éponges et des Champignons. Ces perforations sont toujours remplies de glauconie. On rencontre, en outre, des fragments de tests d'Échinides avec de nombreux piquants.

La fraction sable est essentiellement constituée par du quartz bien roulé, patiné de brun, ce qui communique à l'ensemble une couleur jaune d'or. Les fragments de coquilles très roulés y sont nombreux, ainsi que les Foraminifères remplis de glauconie verte très pâle, brune ou jaune pâle. Ces remplissages même jaunes (*imperfect casts* de MURRAY) donnent pourtant aux rayons X le diagramme normal de la glauconie. On peut aussi observer quelques grains lobés de glauconie verte analogue à celle des grès verts cités plus haut, très souvent détritiques.

Les Foraminifères à remplissage de glauconie existent déjà dans la série des vases beiges (échantillons 6, 7 et 8) et il n'y a, en fait, aucune différence entre les diverses fractions dans ces deux ensembles, sauf leur proportion. Mais dans les sables du large, la coquille a souvent disparu par dissolution et le moule existe seul.

Sur sa carte, PRUVOT a distingué des sables mêlés de vase côtière et des sables mêlés de vase profonde séparés par une bande de sables purs. Comme nous le verrons, il est impossible de distinguer ces deux vases qui sont identiques, par la proportion d'éléments terrigènes. Comme il est impossible, sans échantillons carottés, de séparer les fractions sableuses actuelles des anciennes, la distinction entre les trois catégories est impossible. Il semble bien, toutefois, que dans le cas des sables vaseux qui limitent les sables du large, c'est une pellicule mince de vase qui recouvre des sables purs.

Les problèmes posés par ces sables sont très nombreux. Tout d'abord, PRUVOT les considérerait comme des sables anciens représentant peut-être de ce quaternaire ancien qu'il a découvert au large du cap Creus (I).

Jusqu'à 70 mètres, les fonds au large du cap Creus sont rocheux (zones à Cystoséires et à Bryozoaires). Puis, de cette profondeur jusqu'à la vase du large (— 200 mètres) s'étend un radier, fortement incliné (3 à 4 %), uniquement recouvert de graviers et de granules, très roulés et polis, patinés de brun, portant des individus de *Tubularia indivisa* L., Coelentéré qui n'admet jamais au-dessus de lui de sédimentation vaseuse, si faible soit elle. Il semble bien que nous nous trouvions dans une zone où la turbulence et la vitesse des courants soit, non seulement assez forte pour maintenir la vase en suspension, mais peut être pas suffisamment pour vanner les sables de la vase qu'elles contenaient originellement.

En effet, vers le Nord, les graviers de cap Creus passent aux « sables du large ». PRUVOT et ROBERT remarquent incidemment que les dragées de quartz et surtout les coquilles qui leur sont associées et dont je vais parler passent sous la vase bleue vers le large ou se mêlent à la vase bleue.

Les coquilles, très abondantes et bien conservées, dans le fond à dragées appartiennent à des espèces communes, mais en outre à quelques-unes qui sont disparues aujourd'hui de la Méditerranée ou très confinées. Ce sont : *Mytilus galloprovincialis* LK. var. *herculaea* et *acrocyrta*, *Isocardia cor* L.; *Lutraria elliptica* LK. type et var. *angustior*, *L. oblonga* Gm, *Panopaea norvegica* Spengl., *Astarte sulcata* D.C., *Modiola modiolus* L., *Pecten septemradiatus* O.-F. Mull.; *P. islandicus* O.-F. Mull., *Cyprina islandica* L., *Mya truncata* L.

Cette faune est comparable, dit PRUVOT, à celle du sicilien de Ficarrazzi et de Rhodes et traduirait donc des influences presque subarctiques.

Des éléments de cette faune : notamment *Neptunea contraria*, *Astarte sulcata* et *Modiola modiolus* et la variété *herculea* de *Mytilus galloprovincialis*, *Chlamys islandica* se trouvent également dans le cailloutis qui, sous la vase profonde actuelle, remplit le rech Lacaze-Duthiers, au moins jusqu'à la profondeur de — 600. PRUVOT et ROBERT avaient dragué *Neptunea contraria* au pied de la roche de Fountaindreau (non loin du cirque initial du rech). Jusqu'à présent, malgré l'analogie des éléments graveleux des sables du large de Banyuls et de ceux des fonds du cap Creus, je n'ai pas dragué de vraies coquilles arctiques dans les sables du large.

Il faut ici faire remarquer que la présence de grands Lamellibranches vasicoles dans la faune du cap Creus, comme *Mya arenaria*, les Lutraires, semble indiquer qu'ils proviennent de fonds vaseux et que cette vase, malgré sa cohérence a dû être enlevée postérieurement à son dépôt.

L'âge sicilien en outre ne peut être déduit comme il est classique de le dire de la seule composition de cette faune « arctique », sans qu'aucune superposition stratigraphique ait été constatée. Il n'est pas impossible qu'elle soit beaucoup plus récente, wurmienne par exemple, c'est-à-dire qu'elle daterait de la fin de la dernière glaciation.

Une prise réussie au carottier dans le rech Lacaze-Duthiers a donné 30 centimètres pour la vase grise qui recouvre le cailloutis. Il est vrai qu'elle pénètre souvent dans le cailloutis sur une mince profondeur. On peut donc admettre que l'épaisseur moyenne de la couche de vase la plus récente (post-glaciaire) est de l'ordre de 50 centimètres minimum, à 1 mètre maximum. Les chiffres, d'ailleurs discutables, que nous a donné la Grande Vasière sont du même ordre de grandeur sauf sur les bords où ils sont beaucoup moins importants. On peut toutefois admettre qu'actuellement il se dépose peu de vase dans le cañon.

KUENEN, grand connaisseur en cette matière, évalue l'épaisseur des dépôts post-glaciaires à 30 centimètres sur le plateau, à 50 centimètres au pied du talus et à 20 centimètres dans les eaux profondes.

Un dragage d'un chalutier, commandé par le patron MOREAU, au large de Sète (N. 50° E. de Port-Vendres, à 7 heures à 7 nœuds = 49 milles), à la profondeur de 350 mètres, donc certainement dans l'axe d'un cañon, a ramené des blocs d'une sorte de poudingue à éléments presque exclusivement quartzeux de 1 à 2 centimètres, quelques schistes métamorphiques et calcaires gris avec beaucoup de coquilles couvertes de Serpules, parmi lesquelles *Turritella communis*, *Cyprina islandica*, *Lutraria lutraria*, *Pecten iacobeus*, *Tapes rhomboides* Pennant var. *calabrensis* Gignoux (dét. Mars). Cette dernière variété est caractéristique du calabrien et du sicilien. Le *Tapes rhomboides* est essentiellement atlantique.

La matrice est une vase à Fe S (granules et moules de Foraminifères), délitable et non cimentée, contenant du sable quartzeux fin (0,1 mm), du mica blanc, du zircon, du rutile, et une poudre calcaire à Coccolites, Foraminifères à test mince, embryons de Gastéropodes, spicules d'Holothuries et surtout nombreuses Diatomées bacillaires et *Navicula*.

Il s'agit donc d'une vase côtière déposée à une profondeur où la lumière pouvait encore pénétrer (inférieure à — 100). L'absence de cimentation la distingue de toutes les formations du quaternaire ancien.

Ce remplissage probable du cañon nous pose les mêmes problèmes que celui du rech Lacaze-Duthiers ou du gravier du large du cap Creus.

Les explorations de l'*Atlantis*, dans le golfe du Mexique, ont permis à STETSON de reconnaître trois couches : une, calcaire, à faune chaude à *Globigerinoides rubra*, *Globorotalia Menardi* de 5 à 50 centimètres, une bande rouge à faune mixte, puis de 78 à 125 centimètres des sablons (silts) à texture entrecroisée avec une microfaune froide à *Globigerina bulloides* et *G. pachyderma*.

J.-B. PHLEGER étudiant les longs carottages rapportés par le *Skagerack* de la mer tyrrhénienne donne 100 centimètres pour les couches chaudes, un plus peu de 400 pour les premières couches froides et, après une interruption de 200 centimètres environ, une nouvelle série froide jusqu'à 1.000 centimètres.

Il est donc vraisemblable d'attribuer les cailloutis du cap Creus (= sables du large) et ceux du rech Lacaze-Duthiers à la dernière période froide.

Les auteurs américains les attribuent à la dernière poussée glaciaire. « Wisconsin stage », pour nous ce serait au wurmien. Mais est-il nécessaire de faire coïncider les glaciations et les périodes de refroidissement de la mer ?

On peut douter d'une coïncidence immédiate entre les pénétrations d'eaux boréales et les glaciations scandinaves ou alpines. Il leur a fallu, pour parvenir à Gibraltar, un temps assez long. En outre, qui dit fusion, dit climat chaud. Enfin, l'approfondissement d'un détroit à une époque de compression (calabrien, grimaldien) doit faciliter la pénétration en Méditerranée des eaux profondes et froides de l'Atlantique.

Quoi qu'il en soit, la parfaite continuité entre les sables du large et les graviers du cap Creus peut faire admettre pour les deux fonds la même explication : celle de l'érosion de dépôts vaseux préexistants et d'une absence actuelle de sédimentation. Les courants d'abord très forts, le seraient encore pour disperser la pluie planctonique.

STETSON, sur le plateau de la côte est des États-Unis, a établi que l'on rencontre d'abord des sédiments fins, puis des sables grossiers uniformes (well sorted) (à peu près à — 40 mètres, la cote de nos sables à *Amphioxus*) d'origine glaciaire, portant des traces du gel et arrondis par le vent, vanés par les courants : ces sables passent profondément aux vases à — 60 mètres. Les sédiments grossiers reprennent vers la rupture de pente finale du plateau continental (— 200 m), comme l'avait déjà observé SHEPARD. Ces sédiments grossiers seraient donc triés et façonnés par les courants violents. KUENEN fait remarquer que, pour que la pluie de poussières et de Foraminifères pélagiques actuelle ne recouvre pas le glaciaire, il est nécessaire que cet état de fait se continue encore aujourd'hui.

Le problème est de chercher l'agent de transport si actif à relativement grande profondeur et n'agissant pas dans la région plus proche des côtes. L'activité essentielle de la mer serait de remuer les sédiments du fond qui, ainsi, seraient portés dans la zone d'action des courants qui peuvent les transporter soit à la côte soit au large.

Les mouvements de la houle sur le fond ont été étudiés par VENING MEINESZ en sous-marin. Ceux-ci se produisent suivant des orbites à peu près circulaires dans un plan vertical. L'accélération horizontale des particules d'eau ainsi produite serait donc à peu près égale à l'accélération verticale mais différente en phase de $\pi/2$ notamment en mer du Nord à — 40 mètres.

Il est donc possible d'appliquer la théorie de Gerstner et la règle de Rankine : l'amplitude de la houle diminue de moitié pour une profondeur de un neuvième de sa longueur. Pour une houle de 270 mètres, telle qu'elle a été mesurée par MEINESZ, l'amplitude serait divisée par 2, tous les 30 mètres et à 60 mètres elle serait encore un quart de celle de la surface. La vitesse des particules d'eau étant égale à l'amplitude maxima multipliée par 2π et divisée par la période, la longueur étant 1,56 fois le carré de la période, pour une amplitude de 2 mètres, la vitesse maxima serait 1 mètre par seconde. Pendant un temps extraordinairement mauvais, le sous-marin à 60 mètres de profondeur, subirait un roulis alternatif de 8° .

Donc, à — 60 mètres, d'après KUENEN, la friction de la houle suffirait à mettre en mouvement les matériaux et à les amener vers le rebord du plateau continental. Mais vers le littoral, ce frottement réduirait l'énergie de la vague qui perdrait en amplitude et en longueur. On trouverait donc deux zones d'érosion :

1° Celle des brisants du littoral;

2° Celle correspondant à un optimum d'action de la houle à partir d'une certaine profondeur.

L'élégante théorie de KUENEN, comme celle de PRUVOT et ROBERT, valable pour des sables, soulève pourtant, quand il s'agit de vase, une certaine objection, celle de la considérable cohésion de celle-ci qui fait qu'elle subsiste intacte quand sable et graviers sont enlevés, donnant lieu sur les plages à une microfalaise.

Une hypothèse auxiliaire pourrait peut-être permettre d'expliquer l'ablation de la vase dans tous ces cas : celle de son *émersion* à une époque de régression et de la transformation en schorre de la vasière. La polygonation par dessèchement que subit la vase et surtout les modifications physiques et chimiques qu'elle souffre du fait de sa transformation en sols (remplacement de Na par Ca) et, formation d'agrégats dont la conséquence est qu'elle prend la porosité des sables, facilitent son ablation par les courants lors d'une nouvelle transgression. Il n'est pas déraisonnable d'accepter l'idée d'une régression ante-versilienne atteignant tout le plateau continental. On peut trouver des fondements à cette théorie dans l'indication d'une érosion fluviale encore plus bas jusque dans les rechs (1). Les sables du large offrent, en outre, comme les vases du large, une très curieuse particularité, celle de contenir soit des plaquettes, soit des moules de Lamellibranches, formé d'un grès à ciment glauconieux brun (oxydé) mais le plus souvent vert. Quelques grains lobés de glauconie verte de petite dimension, 0,05 millimètre, peuvent être aussi observés. La glauconie de ces remplissages est parfois brune, le plus souvent d'un vert pâle, presque blanche (imperfect casts de MURRAY). Il semble que ces deux catégories de glauconie ne soient pas contemporaines ; les grès glauconieux étant plus anciens. Ce seraient des produits d'une érosion précédente. Ces éléments gréseux, au voisinage de la roche Fountaindreau, sont à ciment de calcite limpide (voir description des échantillons page 79).

Il faut enfin expliquer l'absence totale de vase sur certaines portions du plateau continental, notamment, comme nous le verrons au large du massif de Marseilleveyre entre le cap Croisette et le Bec d'Aigle et dans la région entre Safi et le cap Cantin au Maroc.

4. Vases du large.

La « vase du large », grise, gris bleu ou verte, se déposerait d'après tous les océanographes, à partir de la limite du plateau continental, mal définie d'ailleurs par une simple cote de profondeur. C'est la *mud line* de MURRAY qui se trouverait à partir de la rupture de pente qui constitue le « talus » ou mieux, puisqu'il est souvent rocheux, l'« abrupt », du plateau continental. Mais PRUVOT avait déjà montré que, vers le large,

(1) Voir notamment UMBROVE : The Pulse of the Earth.

les sables sont déjà mêlés de cette vase, fait que nous avons souvent reconnu exact. Il semble bien que celle-ci, qui est d'origine planctonique, pourrait se déposer partout, mais que, sur une étroite bande, elle ne le peut par suite d'une agitation importante, c'est la bande des sables purs.

Dans la région niçoise, cette limite entre deux vases n'existe à aucun degré et on passe de l'une à l'autre par transition insensible, par une simple diminution des éléments terrigènes et augmentation des éléments planctoniques.

PRUVOT souligne que les différences essentielles entre les sédiments colorés et profonds ne réside en rien dans la nature des éléments de son squelette minéral (sauf peut-être du mica qu'il juge — à tort, à mon avis — presque absent des vases profondes, car, en réalité, il est altéré et transformé en des particules vertes à peine colorées) mais dans l'augmentation de la fraction calcaire (ses analyses à Banyuls donnaient au moins 50 % pour les vases côtières et 27 % pour les vases profondes) et la nature du fer plus ou moins réduit qui conditionnerait la couleur des vases, plus jaunes vers le littoral, plus bleues vers le large, ce qui, pour lui, proviendrait d'une diminution de l'oxygène (Fe O au lieu de Fe² O³). Ce fer, non peroxydé, serait celui soluble dans H Cl.

Nos analyses chimiques nous ont montré :

1° Que la nature tant du squelette minéral que des éléments planctoniques et la partie active étaient la même dans les deux vases;

2° Que le pourcentage en CO³ Ca, comme le remarquait BÖGGILD, était absolument variable et indépendant des conditions topographiques, aussi irrégulier que les taches de calme à la surface de la mer. Les moyennes sont équivalentes, 29,35 (vases côtières), 28,28 (vases profondes du rech). Les seules caractéristiques que l'on puisse mettre en évidence sont une augmentation du C calculé (moyenne vases côtières 1,99, contre vases profondes 3,19) avec une teneur presque constante du N (vases côtières 0,156 contre vases profondes 0,164) et par conséquent une augmentation du rapport C/N qui passe de 7 (vases côtières) à 9 % (vases profondes) avec une égalité pour le fer (de vases côtières, 2,27, vases profondes, 2,19). Ces différences s'accroissent encore, comme nous le verrons, quand il s'agit des sédiments tout à fait au large.

Le squelette de la vase profonde est formé pour la partie gravier de coquilles de Lamellibranches et de fragments de polypiers. Les coquilles sont les suivantes : *Venus verrucosa* L., *Arca Koreni*, *Capulus hungaricus* (L.), *Circe* (*Gouldia*), *minima* (Mtg.), *Glans* (*Cardita*), *aculeata* (Poli), *Peplum* cf. *clavatum* (Poli) *Nuculana fragilis* (Chemr.), *Astarte fusca* (Poli), *Barbatia nodulosa* (Müll.) = *scabra* (Poli), *Astarte sulcata* D.C., *Chlamys clavata* (Poli), *Modiola modiolus* Lk., *Ocenebra* sp. ainsi que *Terebratula vitrea* Gm. et des baguettes ou test de *Cidaris*.

L'ensemble de cette faune, draguée entre — 300 mètres et — 700 mètres, est banal. Elle offre pourtant des caractères beaucoup moins profonds que la région où on la trouve. Par contre *Modiola modiolus* et *Astarte*

sulcata sont des espèces atlantiques (sinon boréales) et font partie de la faune à *Cyprina islandica* draguée dans les cailloutis au large du cap Creus par G. PRUVOT. Ces coquilles sont perforées par les champignons ou des algues tels que ceux décrits par le regretté Abbé FRÉMY, une partie de la calcite du test est parfois transformée en gypse.

A côté de ces coquilles grises, dépolies, on rencontre des exemplaires actuels de *Venus ovata*, *casina*, *gallina*, *Gouldia minima*, *Nucula nucleus*, *Calliostoma ziziphinus*.

Les coquilles sont recouvertes par des tubes d'Hydriaires morts remplis d'une matière verte paraissant être de la glauconie.

La partie minérale de cette fraction est faite de gravier de quartz de filon de 2 centimètres au maximum, patinés de brun, de granite ou d'aplite (rares), de schistes verts du type de ceux de Banyuls, enfin de petits graviers calcaires parfaitement polis, rosés, jaunes, blancs ou gris. Nous en donnerons plus loin les déterminations.

La phase sableuse, riche en quartz, patinée de brun, en biotite décolorée, en débris de coquilles très perforées, les perforations remplies de glauconie, en coquilles intactes, notamment de Ptéropodes et de stades jeunes de Lamellibranches et en curieux agrégats, parfois de rubans godronnés qui sont des excréments d'Annélides, d'Oursins (*Echinocyamus*) et de Lamellibranches très solides et difficiles à dilacérer. Cette phase est, en somme, très analogue à celle des vases littorales, comme la phase sablon où abondent les spicules (Spongiaires siliceux et calcaires, Alcyonaires et Holothuries), Foraminifères très nombreux dont beaucoup de Globigérines. Enfin la phase poudre, essentiellement calcaire contient beaucoup de Coccolites. On peut aussi y signaler des minéraux de l'argile.

La limite supérieure de la vase profonde est fixée par PRUVOT entre 200 et 300 mètres, plus précisément au pied de l'abrupt (ou talus) continental et se poursuit dans la région de Marseille au pied de la falaise Peyssonel et du plateau des Blauquières.

Nous résumerons ci-dessous les caractéristiques chimiques de la vase des rechs : $\text{CO}^3 \text{Ca}$, 28,28 %, C calculé 3,19 %, humus, 0,12 %, N 0,164 % (C/N 9,3 à 47,2 % contre 1,3 à 30 pour les vases côtières), Fe total 2,19 %, sulfure (calculé en Fe S^2), 0,093 %.

La vase des rechs, comme la vase côtière contient beaucoup de fragments de végétaux continentaux amenés à la mer par des inondations, notamment des rhizomes d'*Arundo donax* (canne de Provence) et des feuilles d'arbre.

PRUVOT a donné une analyse des vases profondes du large. Elle est très comparable (1) aux nôtres (vases du rech).

(1) Résumé des analyses de PRUVOT, p. 501.

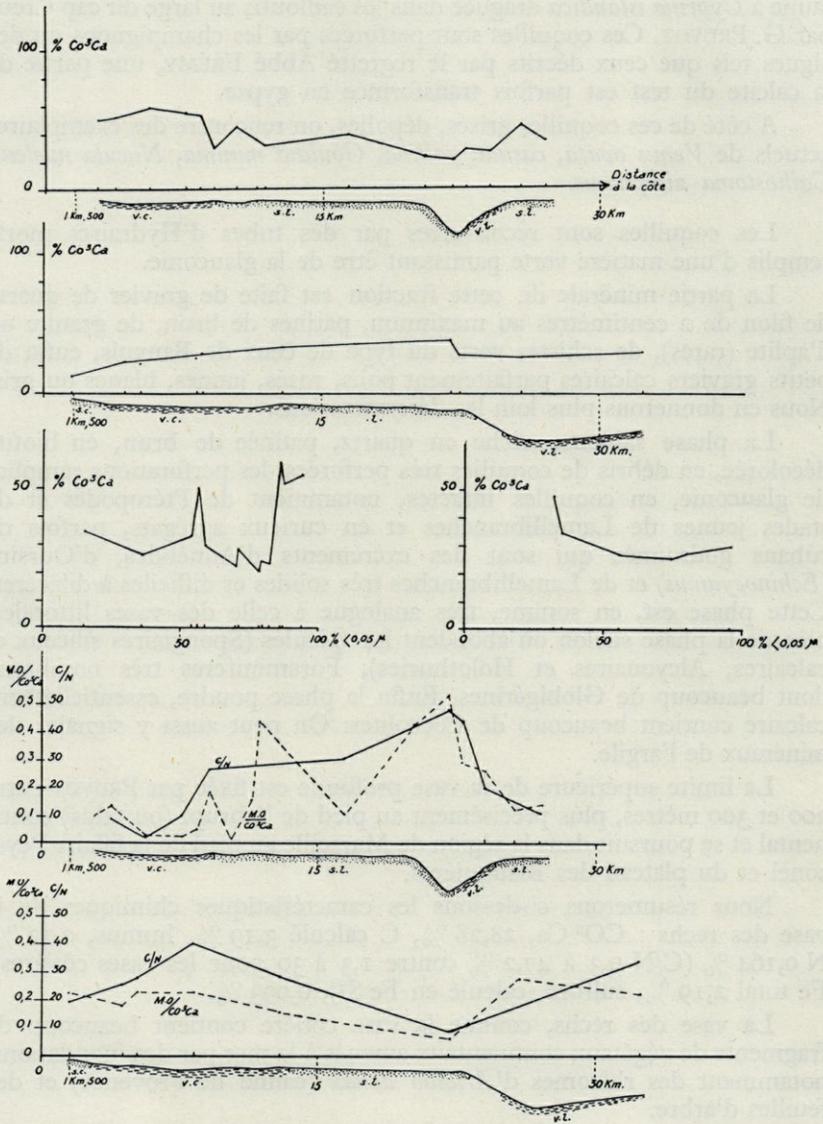


Fig. 1. — Répartition du Co^{3}Ca , du carbone par rapport à l'Azote (C/N) et de la matière organique par rapport au carbone, dans les sédiments en fonction de la distance à la côte et de la profondeur.

	Vases du rech	Vases profondes (PRUVOT)
Carbonates	28,28	28,18
C (organique) . . .	3,19	2,46

Il a, également, parlé de vase recueillie par la sonde sur les parois du rech, vase d'une consistance analogue au mastic qui colle sur les parois du sondeur. J'ai également recueilli cette vase dans le cañon de la Cassidagne, en galets assez consistants sur le fond. Quelques Foraminifères très minces y sont visibles. La proportion des carbonates est, dans notre analyse de 29,2 (35,74 pour PRUVOT), le fer total de 3,1 (presque 1 % de plus que la moyenne des vases), d'après PRUVOT, le carbone organique serait de 2,58 (proportion moyenne des vases).

La couleur bleue serait due pour lui à une complète sulfuration du fer. Je pense que ces vases consistantes sont très différentes des vases beiges fluentes qui recouvrent les cailloutis du fond du rech et qu'elles font partie soit des parois, soit d'un ancien remplissage. Ce point sera discuté à propos de la géologie du rech (p. 517).

En résumé, à Banyuls, le revêtement sédimentaire du plateau continental est le suivant :

A. — *Talus pré littoral* incliné, formé d'abord de galets roulés (de rivière) façonnés par la mer, de débris anguleux et émoussés (éboulis façonnés), grève de tempête ou cordon littoral émergé, puis de *plage de sable fin*, dont la partie supérieure émergée, plus ou moins vaseuse, recouverte jusqu'à 15 mètres en moyenne par les prairies de zostéracés (*Posidonia Caulini*) ou « herbiers ». Les fragments de schistes y dominent les quartz sont très anguleux, de 0 à 25 % de CO³ Ca.

B. — *Graviers côtiers* ou *sables à Amphioxus* (1) essentiellement quartzeux, le plus souvent sable très grossier ou même granules ou graviers, très calibré (pas de sablon ni de vase), grains très arrondis et polis montrant même la trace d'actions éoliennes, patinés en surface par le fer, nombreuses coquilles (habitant normalement les sables vaseux ou même les vases), souvent perforées, également patinées de fer, et tubes de *Ditrupa arietina* (piquants d'alène), pas de glauconie.

Les éléments sont locaux, mais outre le triage mécanique, ils avaient déjà subi une profonde altération. Les sables à *Amphioxus* n'apparaissent que par taches; souvent la vase commence directement après le talus

(1) L'*Amphioxus lanceolatus*, Chordé libre ne se trouve que dans ces sables.

littoral. Au contraire, au cap Creus, ils semblent descendre jusqu'à la vase profonde (— 200 ou — 250 mètres) ne faisant qu'un avec les sables du large.

L'équivalent rocheux est pour A un encorbellement (du type abri sous roche, dû à l'alvéolisation par les sels marins (1), pour B, un peu en dessous de la limite d'oscillation de la mer, le « trottoir » portion horizontale de la roche, préservée de la corrosion par un revêtement d'algues calcaires incrustantes. La suite est formée de roches aiguës sous-marines provenant le plus souvent d'éboulements avec des blocs et des chenaux sableux. La partie inférieure des roches et des blocs est couverte d'une intense végétation d'algues brunes et d'algues calcaires vertes. Suit une partie à *faible pente* (sauf au cap Creus).

C. — *La grande vase* commence vers 30 et 40 mètres ; partiellement, mais non toujours précédée de sables vaseux ou en contenant par taches ; elle se poursuit jusqu'à 90 mètres, puis elle devient de plus en plus mince jusqu'à 110 mètres où elle manque totalement. Dans sa dernière partie, alors que les ramasseurs Léger rapportent de la vase, la drague ramène des « sables du large ».

Cette vase manque au cap Creus où il y a passage direct des graviers côtiers (= sables à *Amphioxus*) aux « sables du large ».

La vase est grise, grise verte, beige (partie du large), noire en profondeur, fluente et collante, elle contient 25 à 30 % de carbonates (poudre provenant de coquilles), 3,3 % de carbone organique (dont 9 % environ est humifié, le reste conservé enfoui), 0,6 % d'azote organique, 2,2 de fer incomplètement sulfuré. C'est le lieu essentiel des chalutages : Soles, Baudroies, Rougets barbets, Roussettes, Holothuries variées, *Isocardia cor*, Commatules et Ophiures, *Echinus acutus* et Spatangues, etc... (1). Le dépôt de la vase correspond à une agitation nulle du fond. Des plateaux rocheux, rugueux, Ouillals, Canalots, la Ruine, surgissent de la vase.

D. — *Les sables du large* débutent sous la vase vers 85-90 mètres, ils sont relativement calibrés, le plus souvent plus riches en carbonate (nombreux débris de calcaire). Les granules et graviers y sont souvent

(1) Les sels des embruns pénètrent dans la roche par ses pores et cristallisent en dilacérant ses éléments. Il se forme ainsi des cavités arrondies (à Banyuls de quelques décimètres. Celles de la Corse granitique (taffoni) ou des Canaries ont quelques mètres ; en Provence (calcaires, porphyres de l'Estérel), c'est de quelques centimètres, mais rongant toute la roche. A Banyuls, ces cavités s'observent dans les quartz et jusqu'à l'altitude de 50 mètres (800 mètres aux Canaries). Le diamètre des cavités et leur fréquence dépend :

1° De la porosité de la roche ;

2° De l'importance des embruns ;

3° De la longueur des intervalles de dessèchement. La sculpture qui en résulte (forme et fréquence des cavités) donne un modelé caractéristique à chaque type de roche.

importants, parfois exclusifs comme au cap Creus. Les quartz, le plus souvent émoussés, sont patinés en jaune d'oxyde de fer ou en vert de glauconie, les minéraux lourds sont fréquents, mais les micas noirs très altérés. Les grains de sable, granules et graviers calcaires (noirs, gris, saumon, blancs) très roulés, sont fréquents (roches des Corbières ou de la couverture des Albères (?)) ainsi que des débris de grès à Foraminifères et glauconie, la glauconie toujours très abondante sous forme de moules d'organismes, parfois dissouts, verts, gris-vert, jaunes, parfois presque blancs.

Les coquilles anciennes, gris-rose, ternes, sont très perforées, les perforations remplies de glauconie verte. Elles appartiennent à des espèces littorales (*Venus verrucosa*, *Lutraria lutraria*), contrastant avec les *Venus ovata*, *casina*, *Nucula* et *Leda*, Dentales qui y sont fréquents. Beaucoup de débris de Coraux et de Bryozoaires, poudre calcaire déjà riche en éléments pélagiques (Globigérines, Ptéropodes). La fraction fine et l'importance des graviers, parfois des galets augmentent en approchant du rebord continental.

Sur les pédoncules les sables du large peuvent descendre jusqu'à 300 mètres.

Vase profonde. — Elle remonte parfois jusque vers 250 mètres sur les promontoires, mais remplit, et quelquefois revêt, les parois des cañons sous-marins, dans le fond sur une épaisseur de l'ordre de 50 centimètres, elle recouvre des graviers et des « faluns » (voir plus bas, géologie sous-marine).

La vase est fluide, collante, de couleur grise passant parfois au gris-bleu. Ni la proportion de sable qu'elle contient (éléments analogues à ceux des sables du large), ni la contenance en carbonate, 28 % pour nous, 21 % pour PRUVOT, contre 29 % (27 % pour PRUVOT), ni celle en matière organique, pour nous 3 % (contre 2 %), 2,5 (contre 2,6), ne la distingue des vases de la grande vasière, pas plus que les éléments pulvérulents (débris de coquilles perforées, fragments de Globigérines, Coccolites), seule la proportion de fer, 3 % contre 2,3 est différente.

Elle ne se sépare pas non plus des vases du large (vase bleue) qui contiennent autant d'éléments terrigènes.

L'image que l'on obtient est une interruption, semblant due à des conditions purement physiques entre les deux bandes de vase, l'une côtière, l'autre profonde.

Comme il a été dit dans l'Introduction, le grand problème est posé par l'existence très générale de la bande de sables intermédiaire au large du plateau. Elle a été reconnue : sur le plateau languedocien, à l'est de Marseille, à Toulon notamment, et sur le grand plateau des Blauquières, enfin sur la côte marocaine.

Dans certains cas, détroits sableux de la Grande Vasière atlantique, région du cap Creus, de Cassis, du cap Cantin à Safi, il n'y a pas de vase.

Un second problème est posé par les sables ou graviers à *Amphioxus* triés, vannés et polis contrastant avec les sables plus fins mélangés d'éléments très fins, à grains anguleux et esquilles de schistes nombreuses, du talus littoral. Le troisième est l'origine même de la vase.

Les sables du large me semblent l'homologue du glaciaire à peine remanié que SHEPARD et STETSON ont décrit sur le Rebord du plateau continental ou parfois coulant au-delà du Rebord.

Eux aussi seraient, à l'origine, des dépôts continentaux, recouverts progressivement par la mer en transgression, qui d'abord y a laissé les coquilles littorales, puis déposé des vases (de 20 à 50 centimètres). Les graviers de ces sables contiennent quelques éléments qui peuvent être datés : des calcaires fins, noirs ou gris fumé du type du lias, des calcaires cristallins analogues à l'urgonien, des calcaires fins à *Alvéolines* du céno-manién, enfin des grès quartzeux souvent glauconieux à *Rotalia* et débris de Coralinacées, cimentés par de la calcite, analogues au quaternaire ancien de la Méditerranée.

Les éléments calcaires sont comparables aux roches des Corbières (ou d'Espagne). Ils peuvent provenir aussi d'une couverture aujourd'hui entièrement disparue des Albères et du Canigou. Tous sont extrêmement roulés. Ajoutons que tous les quartz sont très patinés d'oxyde de fer. Je chercherai l'origine des sables du large dans une grande masse limoneuse, débarrassée en grande partie de son limon par l'action de la mer en transgression, comme elle en débarrasse actuellement les apports des torrents côtiers des Albères, du Tech, de la Têt et de l'Agly, et correspondant aux alluvions très grossières (20 à 10 centimètres de diamètre en moyenne) à pâte rouge de ces rivières dont des accumulations sont très proches de la mer, à l'ancienne batterie d'En-Vaux-d'Argelès et de Lapalme (*a*^{1a} de la carte de Céret). Ces alluvions correspondent à des pentes fortes, à une décomposition intense et à un climat à rares mais fortes précipitations.

Je les assimile aux limons rouges de l'ensemble de la Méditerranée, à l'intervalle acheuléo-moustérien des archéologues, à la période de régression que j'ai appelé *grimaldienne*. La mer se serait alors retirée jusqu'au bord du plateau continental. Nous avons trouvé d'autres arguments dans l'étude de la région à l'est de Marseille et du Maroc.

Malgré l'absence de ces éléments étrangers, les éléments minéraux des sables à *Amphioxus* sont analogues aux sables du large, mais mieux calibrés et beaucoup plus grossiers : le plus souvent ce sont des granules, voire des graviers. La patine ferrique sur les quartz, l'abondance des débris de coquilles les rapprochent des premiers, la seule différence réside dans l'absence de la glauconie. La continuité des deux formations au large du cap Creus autorise, semble-t-il, à leur assigner une communauté d'origine. Mais la faune des coquilles anciennes vasicoles y est plus banale et les espèces froides inconnues. Il est donc possible que cette zone, contrairement à celle du large, ait été l'objet de la transgression à une époque plus tardive, moins froide, ou qu'elle ait subi deux envasements.

L'époque de transgression à laquelle il est vraisemblable d'attribuer la vase est le flandrien. Étudié dans les pays du Nord, il offre plusieurs oscillations transgressives et régressives.

L'origine de la vase des grandes vasières pose un autre problème : celui de son origine. Celle du golfe de Gascogne a été attribuée aux transports de limon par la Gironde, comme celle de Marseille a des apports du Rhône (en sens inverse du courant dominant). La presque identité avec les vases bleues du large, l'existence d'une bande sableuse intermédiaire entre les deux vases avait fait supposer à PRUVOT que la vase côtière provenait des fleuves du Roussillon (et du Languedoc), amenée par le courant normal qui porte au Sud et que la vase profonde proviendrait du golfe de Rosas. L'analogie des deux fractions sable contredit cette hypothèse.

Le fait, en outre, que partout la partie fine de la vase côtière est entièrement planctonique (beaucoup plus que dans les vases littorales ou d'estuaires) notamment que les fines coquilles de Lamellibranches et de Ptéropodes et surtout les débris de Coccolithophoridés y abondent, l'importance des Spicules, des Diatomées et des Radiolaires lui donnent (et cela est vrai pour une très grande part des vases littorales et d'estuaire) une origine spécifiquement marine pour sa partie fine. Sable et limons proviendraient par contre du continent.

Comment se fait le mélange? On ne se posait guère cette question quand on pensait que la vase provenait soit du dépôt extrêmement lent des particules les plus fines amenées par les cours d'eau soit de la « floculation » par le Na Cl de l'eau de mer de colloïdes argileux en suspension stable. Nous avons fait justice en Manche (1) des deux premières théories, la vase vient en grande partie de la mer et elle se dépose à basse-mer jusqu'à l'extrême limite de la marée (à Poses pour la Seine), mais depuis Rouen l'eau est douce. La vase est un complexe où la phase sable et surtout la phase sablon sont abondamment représentées, mais elle est une, le mélange est stable. En revanche dès qu'on l'agite avec de l'eau, douce ou de mer, elle ne se reforme plus, ses différentes phases constitutives se sédimentent par ordre de dimension décroissante et il est aussi impossible de la reconstituer que de refaire de l'écume détruite.

Nous pensons que l'essentiel de la vase est transporté simultanément : sable et sablon surtout siliceux parfois organique, poudre calcaire et micacée, précolloïdes argileux et liant ferro-humique. L'ensemble est assemblé sous forme de *flocons* d'une densité à peu près analogue à celle de l'eau par suite de l'air adsorbé.

Dans les estuaires et les baies abritées, en zone littorale, ces flocons se collent, comme l'écume et les objets flottés contre les objets mouillés et surtout la vase, avec laquelle ils font définitivement corps.

J. BOURCART et Claude FRANCIS-BŒUF, La Vase. — *Actualités Scientifiques et Industrielles*. Paris 1942.

Mais d'où viennent les flocons? Les sables et sablons amenés en mer par les fleuves (ici uniquement par les grandes crues) ou dragués par la houle de tempête sur le fond, jusqu'à — 30 mètres d'après une observation de PRUVOT (alluvions continentales plus ou moins complètement transformées) sont tenus en suspension dans la zone agitée ainsi que des bulles d'air. La surface de celle-ci constitue pour toutes les particules une zone d'attraction capillaire et c'est là qu'elles s'assemblent. La diminution progressive des dimensions des bulles de l'écume, la disparition progressive (diffusion, consommation bactérienne) de l'air inclus ou adsorbé amène la formation des flocons. Ceux-ci, qui ont été observés dans la Seine maritime, à Roscoff et en Gironde par temps absolument calme ont 2 à 3 centimètres de longueur et un peu la forme des tétards de grenouille.

De plus petits flocons, comme ceux par lesquels se coagulent beaucoup de sols, peuvent aussi se former au hasard des rencontres; pourvu que la somme des charges électriques soit nulle, ils resteront stables et si la sédimentation se produit, la vase est définitivement stable.

Les conditions de formation de l'écume favorisent donc la sédimentation de la vase: abondance de sablon, donc abondance de limons fluviatiles et de fragments animaux de même dimension, agitation de la mer dans la zone littorale, importance des apports de poudre calcaire (le plus souvent d'origine planctonique ou due à la pulvérisation des coquilles par les champignons et algues microscopiques), et des micas flottés, présence de débris d'algues ou de plancton cellulosique générateur de l'humus du liant. Le fer, plus ou moins sulfuré, est toujours présent dans les vases.

Dans les petits estuaires, les ports et les baies abritées, la sédimentation se fait uniquement par la formation sur les deux rives d'un glaciais vaseux, la slikke. Les deux talus laissent entre eux un chenal sableux. Dans la mer ouverte, les dépôts de vase peuvent se faire à l'ombre des îles (Bréhat) par le même mécanisme que dans les estuaires. Mais, dans le cas de grands estuaires, comme la Gironde, le phénomène est différent: les particules, puis les flocons se rassemblent en formant ce que L. GLANGEAUD a appelé le « bouchon vaseux » qui va et vient avec la marée. Mais au cours de ce mouvement, les flocons perdant l'air inclus ou adsorbé se rassemblent dans les zones profondes constituant le « nuage » des plongeurs. Lorsque la proximité des particules est suffisante, leurs chances de remonter augmentent et il se produit une vraie coagulation. Ce mécanisme de sédimentation est celui que nous avons observé à Nice et à Villefranche où la vase calcaire (50 % environ de $\text{CO}_3 \text{Ca}$) remplit tous les creux et notamment les cañons sous-marins les plus proches du littoral. Elle y est amenée par les courants profonds portant à la côte, dans le cas du mistral (vent soufflant à droite du littoral). La présence constante de Cocolithes et Globigérines et de Radioaires, marque bien l'origine planctonique de cette vase.

Un dernier problème est celui de la glauconie. COLLET et LEE qui l'ont surtout étudiée dans les moules, à la suite des travaux de MURRAY et RENARD, en étaient arrivés aux conclusions suivantes :

Le premier stade est celui des moules gris qui seraient de l'argile, silicate d'alumine hydraté (1) mais les spectres aux rayons X nous ont montré que les moules gris étaient, à Villefranche, déjà de la glauconie. Ils ne contiennent pas de grains de quartz (contrairement à ce qui se passe pour les granules ou grains).

Le second stade serait le remplacement dans les moules du silicate d'alumine par l'oxyde de fer. Ces moules contiennent de l'alumine mais pas de potasse.

Le troisième stade serait la transformation en glauconie par introduction de Si O_2 et de potasse.

Ayant observé assez souvent le remplissage par du sulfure de fer Fe S des cavités des Foraminifères, Bryozoaires, piquants d'Oursins, perforation de coquilles, je propose, comme hypothèse de travail le schéma suivant :

1^o Moules sulfurés (évoluant parfois en pyrite), dus à l'attraction des ions Fe et S par un noyau dû à la décomposition du protoplasma des Foraminifères, etc...;

2^o Oxydation de ces moules et leur transformation en $\text{Fe}^2 \text{O}^3$ quand les Foraminifères, etc... sont portés dans une zone oxydante, la vase ayant été préalablement détruite (au cours d'une régression où la fraction sableuse est tirée de la vase et laissée sur le sol) (1);

3^o Transformation du $\text{Fe}^2 \text{O}^3$ en glauconie en présence d'ions Si O^3 (provenant des spicules d'Éponges et autres organismes siliceux) et du $\text{K}^2 \text{O}$ de l'eau de mer. Cette transformation ne serait possible qu'à partir d'une certaine profondeur, 70 mètres probablement (7 kg/cm^2), l'atmosphère restant oxydante.

Il en résulterait que les sables glauconieux, dits sables du large, seraient d'anciennes vases triées et recouvertes par la vase côtière actuelle qui progresse doucement vers le large.

Les sables verts, qui eux sont en dessous du plateau continental, correspondraient à un remaniement (mise en « sol »), puis à une concentration de la glauconie. Celle-ci transformée en sol, se fixerait sur la poudre argileuse ou micacée dans les boues vertes, s'accumulerait à la base sur les galets ou sédiments durs; enfin, dans les bulles de gaz (grains de glauconie).

(1) Observé dans le pliocène de Nice (F. OTTMANN) et d'Alger (M^me PROIX-NOE).

Cette transformation — qui peut se faire dans la profondeur des sédiments accumulés (mais souvent non consolidés, cf. PETERSSON) semble impliquer la présence de phosphate de calcium. Il n'est pas exclu qu'elle soit due à une action bactérienne. C'est dans ce sens que je compte orienter mes nouvelles recherches.

FORMES DU PLATEAU CONTINENTAL AU LARGE DE BANYULS

GÉOGRAPHIE DU PLATEAU

On avait longtemps considéré le plateau comme une plaine uniformément inclinée vers la mer jusqu'à la cote — 200, puis terminée par un talus (MURRAY) ou par une falaise (SHEPARD, MARION, expédition du *Caudan*, L. JOUBIN, expédition du *Th. Tissier*), descendant rapidement jusqu'aux fonds de 1.000 mètres.

Le tableau qu'a donné PRUVOT dans sa très belle exploration à bord du *Roland* (1893-1894) est déjà très différent et aux détails près, parfaitement exact.

1° Le plateau n'est pas plat sur le littoral :

a) Il comporte à 1 mille 1/2, à 2 milles au large du Roussillon des alignements, S. 1/4 N.-E. - N. 1/4 N.-W., de roches Tavac-Saint-Cyprien (au large d'Argelès), Traversières (au large du cap Gros), Roches-Saint-André-Cerbère, puis S.-N. plateau de Saint-Nazaire; roche de la Têt et Toreilhes, banc de Saint-Laurent, plus au large Lannier, le Géomètre, des 21 à 40 mètres, Roche Vidal, 51 mètres.

b) Au large du littoral des Albères, des fonds très hérissés, redoutés des chalutiers du Sud au Nord : Roches Ouillals, Cannalots, la Ruine, par des fonds de 80 à 100 mètres.

c) Son bord est incisé par trois grands ravins ou rechs (nom catalan) du Sud au Nord dans les eaux espagnoles, le rech du Cap, le rech Lacaze-Duthiers et un troisième affluent de celui-ci.

Des pédoncules les séparent : plateau Roland entre rech du Cap et rech Lacaze-Duthiers, plaine (il vaudrait mieux dire rameau) du Balandrau entre ce dernier et son affluent.

Nos connaissances en étaient restées à ce stade quand j'ai entrepris en 1946 à bord du dragueur 333, et surtout en 1947 sur le chasseur 142 commandé par l'Enseigne de Vaisseau de la Bernardie — qui a pris une très grande part à cette recherche, l'étude systématique du rech Lacaze-Duthiers, M^{lle} LALOU qui a recalculé les abscisses des coupes transversales faites au sondeur inscripteur, MM. VILLA, LEFÈVRE et VINCENT ont été associés à cette recherche dont les résultats seront donnés plus loin.

En communiquant les premiers résultats au C.O.E.C., j'ai appris que l'ingénieur hydrographe MARTI avait, avant cette dernière guerre, entrepris une campagne de sondage par le son, de Cannes à Port-Vendres. La carte qui résulte de cette mission était restée secrète. Grâce à la bienveillance du Ministre de la Marine et du S.H.M., elle a pu quitter les archives et m'a été communiquée. Parmi les 17 rechs ou cañons, si l'on adopte cette dénomination, MARTI a relevé également les deux rechs précités. Ses sondages discontinus suivant des routes arbitraires ne donnent pas la morphologie du cañon, et ils se prolongent jusqu'à 2.000 mètres, négligeant la partie supérieure du plateau. L'image que donnait PRUVOT du plateau au large des Albères est générale jusqu'à Menton (vraisemblablement jusqu'à Livourne) : suite de profondes vallées séparées par des pédoncules relativement étroits.

d) Nous avons pu entreprendre avec succès des dragages dans le rech Lacaze-Duthiers, en rapporter plusieurs échantillons de fond et des parois, seule méthode permettant de connaître quelque chose de la géologie profonde du plateau. Il importe d'abord de décrire les méthodes employées, actuellement bien fixées.

Elles ont été exécutées avec le sondeur enregistreur et à cadran NJ 3 *Boston Submarine Co*, existant sur les chasseurs et escorteurs français de construction américaine. L'inscription se fait jusqu'à 190 brasses; mais, quand l'appareil est bien réglé, on peut noter les échos jusqu'à 800 brasses.

Un premier travail, simplifié par les cartes de PRUVOT et l'expérience obtenue à bord du dragueur 333, a consisté à encadrer le cañon dans une ligne de moins de 100 mètres, de façon à ne laisser échapper aucun affluent. Le talweg étant reconnu, et sa direction déterminée, une série de coupes transversales a été effectuée en travers de ce rech et de celui qui est au Nord-Est. Les termes de chaque coupe et des points intermédiaires, inscrits sur l'enregistrement du sondeur (tops) ont été déterminés avec deux cercles hydrographiques de la passerelle, la vitesse (la plus faible possible) étant constante pour chaque coupe. Une coupe longitudinale a été également exécutée.

Cette méthode n'a pu être appliquée avec le même succès aux roches hérissant le plateau comme les Canalots dont nous ignorions la direction des alignements, ce qui fait que l'image donnée par le sondeur est vague. Là les sondages ont été exécutés par enregistrement en pieds, malgré la profondeur de 80 à 90 mètres au double écho.

Les dragages géologiques ont été effectués par la méthode suivante : coupe au sondeur inscripteur sur un trajet déjà connu, tir d'une cartouche colorée au moment où l'on atteint le talweg, manœuvre de la drague Charcot, dragage transversalement à la paroi. Chaque fois la drague arrache une aspérité dont la cassure fraîche contraste avec la patine extérieure.

Mais on ne connaît que les profondeurs initiale et finale du dragage, il faut reconstituer le puzzle, facile s'il y a des fossiles, moins aisé, mais éclairé par les autres coupes et surtout par les études pétrographiques des roches continentales ou des graviers du rech.

L'étude du fond a été faite :

- 1° Au ramasseur Léger;
- 2° Au carottier de 60 centimètres, d'emploi difficile;
- 3° A la drague Charcot en trajet longitudinal, mais il faut compter plus de deux fois plus de câble que de profondeur.

FORMES LITTORALES ANCIENNES

Un des alignements de roches, sensiblement nord-sud, qui ont déjà été signalés et qui sont figurés sur la carte marine et sur celle de PRUVOT, se poursuit au large de Saint-Laurent de la Salanque : ce sont, du Sud au Nord, les roches Tavec (— 21 m), Saint-Cyprien (— 26 m), Cerbère (— 30 m), etc... Elles semblent former une, ou plutôt deux dorsales étroites avec des culminations assez douces; elles sont fréquentées par les pêcheurs de langoustes. Les dragages que j'ai pu faire à bord de l'*Amphioxus*, embarcation à moteur du Laboratoire de Banyuls m'ont permis de récolter :

a) Des grès à grain fin, à ciment de calcite, souvent des cylindres ou colonnettes dégagés (remplissage de trous de racines) qui sont attribuables à des dunes cimentées et submergées. Ces dunes semblent dater du quaternaire ancien. Elles se prolongent au Nord par la plage et la dune cimentée citée plus haut du Barcarès de Leucate et de Lapalme (+ 1 m) et être comparable aux dunes des roches Notre-Dame-d'Agde;

b) Des galets de 20 à 5 centimètres de grand axe formés surtout de quartz et de quartzites fortement patinés de brun par du fer, de granite décomposé et brunis, de gneiss et de micaschistes, de schistes et microgrès des Albères absolument analogues aux alluvions anciennes du Tech;

c) Des coquilles patinées de noir (Fe S) parfois avec des parties oxydées, de *Lutraria lutraria*, *Mya truncata*, *Meretrix chione*, *Pecten jacobaeus*, *Venus casina*.

De très nombreuses coquilles actuelles, des bois flottés couverts de Bryozoaires et des boules de *Lithothamnium* parsèment le sommet de la roche. Le fond, recouvrant les cailloutis, est fait de vase noire gluante.

SURFACES RUGUEUSES DU PLATEAU

Elles ont été signalées par PRUVOT sur sa carte; ce sont du Sud au Nord, les roches Ouillals (= canines) en face de Cerbère, les Canalots (diminutifs de canne : *Arundo donax*, nom appliqué aux agglomérations de *Protula*) et à 1 mètre de ceux-ci, la Ruine. Les uns et les autres, par

des fonds variant de 70 à 90 mètres, sont actuellement envahis par la vase dans les chenaux et non au milieu des sables du large comme le signalait PRUVOT.

Celui-ci, remarquant que les deux derniers sont dans un alignement qui va du pic Sailfort (Saillefore) par la tour Madeloc et le cap Béar, supposait qu'il s'agissait d'un prolongement des Albères, donc des Pyrénées, vers la Provence. La roche Fountaindreau dont il sera parlé plus loin en aurait constitué un autre.

Les dragages y ramènent essentiellement des plaques de conglomérats de coquilles analogues aux « cadoules » de l'étang de Thau, mais cimentées essentiellement par les tubes des *Protula*. Il s'agit d'un concrétionnement purement biologique.

Mais y a-t-il réellement un fond rocheux ? Nous avons tenté d'abord d'en connaître la morphologie par une série de coupes N. 1/4 W.-S 1/4 E., effectuées par le chasseur 142 (fig.). Chaque groupe montre une série de vallonnements de 20 mètres de profondeur séparés par des crêtes. Nous pensions donc qu'il s'agissait de collines (bancs ou dunes de direction W. 1/4 W.-N.-W. - E. 1/4 E.-S.-E., orientation un peu inattendue, car perpendiculaire au littoral. Mais en essayant de restituer le relief avec les différentes coupes, M^{lle} LALOU n'a pu obtenir de correspondance entre les divers sommets. Il est nécessaire, pour connaître exactement la forme des Canalots, d'exécuter une série de coupes perpendiculaires aux premières en sondage continu; mais il s'agit sûrement d'un relief rocheux.

Les dragages à bord du chasseur 142 n'ont rapporté sous la vase, 20 centimètres environ, que des graviers à éléments des Albères et quelques graviers calcaires des Corbières.

A bord de l'*Amphioxus*, nous avons réussi à récolter une roche curieuse, par ailleurs retrouvée deux fois en galets dans les sables du large. Elle est uniquement faite de grains de glauconie cimentés par de la calcite limpide.

La roche n'est pas comparable aux grès qui existent au bord du rech et que nous avons quelques raisons de considérer comme quaternaires anciens. Elle est également très différente du miocène sous-marin que nous décrivons plus bas. La possibilité la plus vraisemblable est d'en faire du pliocène ancien.

Le littoral de cette époque atteint au moins 100 mètres pour le Tech au Boulou, pour la Cantarrane à Trouillas, pour la Têt à Neffiach (101 m) et pour l'Agly en amont d'Estagel, c'est-à-dire à plus de 30 kilomètres en arrière de la côte actuelle. Le pliocène ancien est constitué par des vases du type des vases côtières actuelles. Il est possible que les Canalots à cette époque aient été en dessous du Rebord et que cette roche corresponde à un triage des sables verts ou à un concrétionnement de la glauconie à la base des sédiments du type de la « glauconie de transgression ».

L'image par la restitution des sondages évoque plutôt des bancs d'une dureté variable sculptés par l'érosion subaérienne que des couches plissées.

Les recherches sont à reprendre en utilisant, vu la difficulté des dragages, un sondeur-canon du type Piggot ou Schlumberger. Mais actuellement, on peut être certain que les Canalots sont un fond rocheux.

Le travail essentiel, effectué pendant l'année 1947, a consisté à obtenir la forme et la nature des parois du rech Lacaze-Duthiers, suivant la méthode décrite plus haut (p. 509).

Nous n'avons pu explorer, vu la portée du sondeur, que la partie antérieure du cañon, mais tout le cañon a été l'objet des sondages en ligne de MARTI. La partie commune a facilement pu être intégrée dans notre levé.

Le rech Lacaze-Duthiers (Pl. II) se présente sous la forme d'une vallée linéaire de direction d'abord N. 1/4 N.-W. - S 1/4 S.-E., s'infléchissant à partir de Cerbère vers l'E.-S.-E. Débutant, comme ses ravins affluents, à — 150 mètres, il se poursuit d'après les sondages de MARTI au moins jusqu'à — 2.000. La longueur que nous avons levée est de 23 kilomètres.

La vallée est étroite : 4,800 kilomètres jusqu'au parallèle d'Argelès (cote — 520), puis s'élargit progressivement jusqu'à 9 kilomètres. Dans la première partie, sa forme est nettement en V avec des parois de 60° environ. Le début est un cirque situé beaucoup plus haut que le pensait PRUVOT (la roche Fountaindreau n'est pas au commencement mais sur la rive ouest, un peu au nord du parallèle d'Argelès et ce n'est qu'une aspérité des parois et non un « pic isolé sur le plateau »).

Deux parties se distinguent ensuite dans les parois : la première jusqu'à — 400 (100 mètres environ au-dessous des plateaux) est très raide (65°), plus raide encore dans le détail, car la pente est en marches séparées par des vires. La morphologie est celle de la gorge du Tarn ou de la Jonte, c'est-à-dire d'un véritable cañon. Les ravins affluents sont très courts, en forme de cirques, les crêtes qui les séparent sont étroites et déterminent des étranglements.

La partie basse (en dessous de — 400) a un profil assez régulier en V avec des cirques et des ressauts qui évoquent des éboulements. L'ensemble a une morphologie de schistes ou d'argiles. Il semble qu'une direction tectonique W.-N.-W. - E.-S.-E. peut être décelée par les coupes.

La pente longitudinale moyenne est de 3,3 %. Elle est un peu plus faible que celle des cañons américains. Très forte dans le cirque initial (1), elle s'accidente de deux ruptures, sorte de rapides à — 400 (passage probable au fond « schisteux ») et à — 650.

(1) Le cirque initial est vraisemblablement entaillé dans un ravin plus ancien bouché par les sables aspirés par les courants.

Le rech Lacaze-Duthiers est encadré de deux autres : le rech du Cap, sur sa rive droite dans l'axe du golfe de la Selva, son cirque initial étend près des roches Ouillals et le rech innominé que nous appellerons rech Pruvot sur sa rive gauche.

Le premier, trop près des eaux espagnoles pour pouvoir être exploré, est séparé du rech Lacaze-Duthiers par le pédoncule sableux dit « plateau Rolland ». Sa direction paraît W.-N.-W. - E.-S.E. Il rejoindrait le rech Lacaze-Duthiers entre 1.000 et 2.000 mètres.

Le rech Pruvot, mal connu de cet auteur, a été relevé par nous, mais les termes des coupes, très éloignées de la côte étant souvent fixés à l'estime nous avons figuré son tracé sur la carte en pointillé. La forme paraît en S, d'abord parallèle au premier dont il n'est séparé que par un pédoncule étroit, il s'en éloigne pour s'en rapprocher vers 1.000 mètres.

D'après la carte de MARTI, 17 autres cañons, tout à fait analogues accidentent le plateau. Ils sont tous perpendiculaires à la ligne qui joint le cap Creus au cap Sicié. Une avarie du chasseur 142 ne nous a permis d'explorer que la partie supérieure du rech de la Cassidagne.

On observera les extraordinaires analogies qui existent entre ces rechs et les cañons sous-marins que STETSON a pu lever sur les bords du Georges Bank.

La courbe de 100 mètres qui est en dehors des rechs montre déjà des inflexions qui enveloppent ceux-ci, mais la pente, plus forte pourtant que celle du plateau est très douce. Le modelé entre — 100 et — 150 évoque les vallées mortes des Causses, anciennes vallées pliocènes, et l'encaissement brutal dès le cirque de source. La partie du plateau qui se trouve au large ne paraît donc pas biseauté par une pénélplanation postérieure à la formation du rech.

GÉOLOGIE DU RECH

Il est essentiellement difficile, vu l'épaisseur des sédiments et l'aplatissement des bancs affleurants, d'obtenir des échantillons de roche renseignant sur la structure du plateau, si même le canon Schlumberger prélevait des carottes rocheuses, il est probable qu'elles ne traverseraient que le recouvrement très probablement quaternaire, comme nous allons voir.

Les premiers dragages effectués autour de la roche Fountaindeau par PRUVOT lui ont donné, sur le plateau, des grès « friables » faits de sable de 0,2 millimètre bien roulé, des conglomérats contenant des coraux : *Lophohelia*, *Amphihelia*, *Dendrophyllia* et les Brachiopodes avec surtout des tubes de Serpules, cimenté par un ciment brun pain d'épice contenant souvent des paillettes de mica. L'analyse du ciment lui a donné :

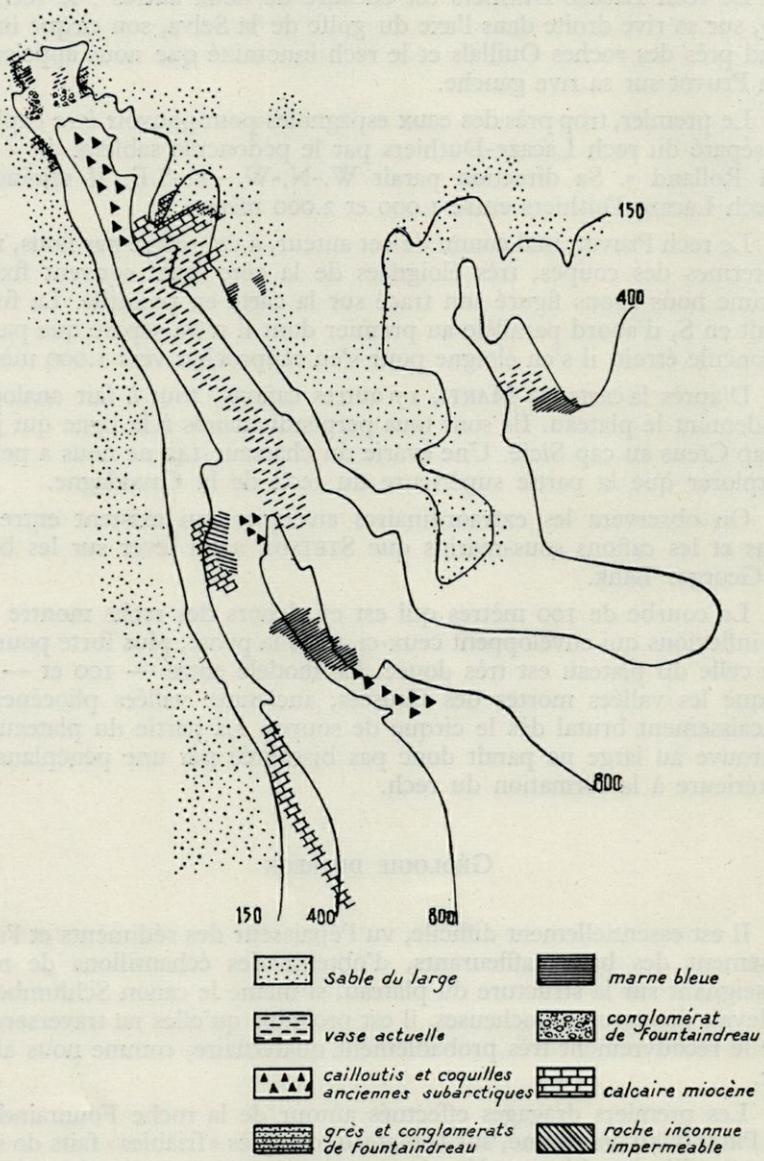


Fig. 2. — Essai de Carte Géologique du Rech Lacaze-Duthiers.

	— 390 m	— 393 m
Fe ² O ³ ...	6,03	12,06
Mn ² O ³ ...	0,52	3,30
Mg.....	11,97	3,84

La proportion de manganèse est relativement élevée. De la vase bleue est fixée dans les cavités. Des concrétions analogues, probablement éboulées, ont été également draguées dans le fond du rech.

Au voisinage de la roche Fountaindreau, sur le côté sud, PRUVOT a dragué des galets arrondis et polis, parfois « gros comme une tête d'enfant », de schistes, quartzite, granulite à patine jaune-brun et des conglomérats à ciment ferromanganique.

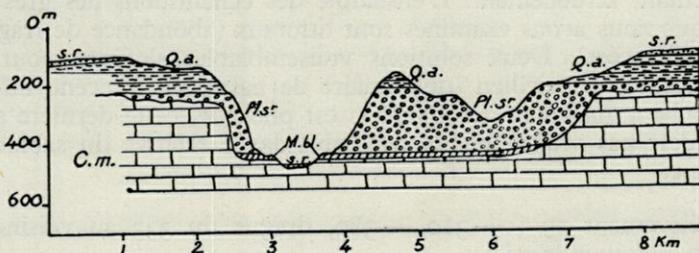


Fig. 3

Essai d'interprétation des dragages géologiques dans le rech Lacaze-Duthiers. s.r. : sédiments récents; Q.a. : Quaternaire ancien; Pl.st. : pliocène supérieur; M.bl. : marnes bleues; C.m. : calcaire miocène.

Voici classés les échantillons que nous avons pu draguer à bord du dragueur 333 et du chasseur 142 en 1946 et 1947.

Partie initiale du rech.

Dragage A 10 : — 360, — 160; prélèvements A 11 : — 250, A 12 : — 240.

a) Calcaire gréseux jaune-brun : quartz de 0,5 à 0,3 millimètre, calcaire cristallin à calcite mâclée (urgonien probable), calcaire crayeux à Foraminifères (crétacé supérieur probable), feldspath, chlorite, muscovite, hornblende verte, zircon. Le ciment est en calcite finement grenue. Les échantillons, moins gréseux ressemblent aux grès à ciment calcaire dragués sur le plateau continental et au quaternaire ancien des roches de Notre-Dame-d'Antibes et de la rade de Toulon. Ils appartiennent probablement à la même formation que les « grès friables » de PRUVOT.

Quaternaire ancien.

Prélèvements A 12 : — 240, 17 : — 350, 24 : — 310; A 7 : — 390.

b) Marne bleue azur compacte, ressemblant à du mastic : CO^3 Ca, 35 % (moyenne des vases du rech : 28 %), fer 3,1 % (contre 2,20 %) contenant 16 % de sablon aigu de 0,03 à 0,02 millimètre (contre 20 à 25 %), grains roulés de craie, biotite entièrement décolorée dans une très fine poudre calcaire avec Foraminifères minces (*Globigerina*), spicules d'Éponges siliceuses. Les caractères analytiques correspondent à ceux de l'échantillon F, étudié par PRUVOT qui l'aurait ramené du fond du rech et des vases se trouvant dans les cavités des concrétions ferromanganiques.

Il est difficile d'y voir, comme PRUVOT, une transformation de la vase actuelle. Il est assez vraisemblable de penser, comme il le faisait, qu'elle est sous les « grès friables » du plateau, mais il considère ceux-ci comme se cimentant actuellement. L'ensemble des échantillons des grès supérieurs que nous avons examinés sont littoraux (abondance de fragments de Corallinacées). Deux solutions vraisemblables s'offrent pour dater cette vase bleue : sicilien (quaternaire de base), ou pliocène inférieur. Si la roche à glauconie des Canalots est pliocène, cette dernière assimilation n'est pas vraisemblable, vu l'abondance relative du sablon dans cette vase.

Prélèvement 29 : — 310 — 380, drague du 333 au voisinage de la roche Fountaindreau :

c) Grès grossier et conglomérat fin à ciment brun ferro-manganique, les éléments sont très bien roulés et polis : quartz de filon 10 à 0,5 millimètres, granite, schistes à chlorite, quartzites, calcaire noir (paléozoïque?), ciment ferro-manganique avec poudre quartzreuse et biotite jaune d'or.

Ces prélèvements ou dragages correspondent à des parties accidentées de la rive droite du rech et à des éboulis dans les cirques affluents. Une de ces aspérités est probablement la roche Fountaindreau.

On peut comparer ce conglomérat avec les gros galets à ciment ferro-manganique que signale PRUVOT. Tout donne à penser qu'il est recouvert, sauf les aiguilles, par les vases bleues.

En nous basant sur la dimension des éléments, sur leur parfait polissage, sur le fait que pas la plus petite trace d'élément marin n'y a été rencontré jusqu'ici, nous l'assimilerons aux dépôts de la fin du pliocène ou du début du quaternaire (villafranchien), période, sur le continent, de forte érosion fluviale et de sols rouges presque latéritiques. A ce moment la régression marine était très forte (on ne connaît pas le littoral) et le climat certainement très chaud sur le littoral.

Dragage A 18 : — 780 — 900 :

d) Calcaire gris bleu, finement cristallin, avec de nombreuses coquilles et débris crayeux, sablon de 0,3-0,2 millimètre, feldspath plagioclase, hornblende verte, chlorite, muscovite, zircon, grains de glauconie, fossiles : *Cytherea* sp., *Callista pedemontana* Ag., ce dernier fossile est vindobonien (miocène moyen). La roche est presque semblable au miocène de Salies-de-Béarn.

On peut essayer de restituer (fig. 3) ainsi la constitution de la gorge :

- a) Calcaire ou grès du quaternaire inférieur jusqu'à — 240 — 250;
- b) Marne bleue, sicilien ou pliocène ancien, jusqu'à — 380 (dans le premier cas, elles sont sur les conglomérats, dans le second cas elles sont sous les conglomérats);
- c) Conglomérats ou grès à ciment ferro-magnésien (pliocène supérieur) jusque entre — 310 et — 380. Si l'on admet que les marnes *b* sont plaisanciennes; ils fossiliseraient un ancien ravin creusé dans ces marnes;
- d) Calcaires « marneux » bleus vindoboniens, recueillis entre — 700 et — 780, base à — 850;
- e) Série d'âge inconnue.

Au point de vue morphologique, la rupture de pente à — 400 correspondrait peut-être à l'affleurement des marnes, mais deux hypothèses peuvent encore être faites :

1° L'à-pic supérieur jusqu'à — 400 est fait des grès et conglomérats villafranchiens;

2° Toute la gorge jusqu'à — 850 est faite de calcaires miocènes. Elle a été creusée au miocène supérieur et incomplètement remplie par des sédiments pliocènes et villafranchiens. La gorge miocène aurait été beaucoup plus large que la gorge actuelle.

Un nouveau creusement aurait eu lieu à la fin du villafranchien et le quaternaire ancien aurait plus ou moins courbé la gorge. Enfin un dernier creusement correspondrait à l'âge des alluvions du continent (acheuléo-moustérien). Les conglomérats villafranchiens auraient été alors découpés en aiguilles comme la roche Fountaindreau.

Le remplissage meuble de la gorge peut un peu nous guider dans cette histoire. Sous 50 centimètres de vase grise, analogue à la vase côtière, comme il a été dit, se trouvent (parfois à nu) jusqu'à — 750, un cailloutis arrondi et très poli, de 30 à 5 millimètres de grand axe, outre une grande abondance de quartz de filon patiné et des éléments des Albères, certains revêtus et patinés d'une patine ferro-manganique (PRUVOT en avait déjà dragué) et, en nombre au moins égal.

A. — Des calcaires cristallins à Foraminifères urgoniens (1).

B. — Des calcaires blancs à grain fin à *Orbitolina* et *Ovalveolina ovum* analogues au Cénomaniens moyen et supérieur des Corbières et de Montalban en Espagne.

C. — Des calcaires littoraux chamois à grains de quartz et glauconie avec *Lithothamnium* et Bryozoaires et une faune de Foraminifères de l'éocène ou de l'oligocène.

D. — Des calcaires à sable quartzeux et grains de glauconie avec *Rotalia Beccarii*, *Amphiroa*, *Fania*, analogues à ceux du plateau et du bord du rech (quaternaire ancien probable), ces éléments existent presque tous dans les graviers du plateau continental.

Ils sont associés à des coquilles très perforées, grises, un peu sulfatées dont la liste est la suivante (dét. A. CHAVAN).

Dragage du 333 :

Fissurella graeca Lk
Capulus hungaricus L
Circe (Gouldia) minima (Mtg)
Glans (Cardita) aculeata (Poli)
Venus verrucosa (L)
Barbatia nodulosa (Mull.)
Chlamys clavata (Poli)
Nuculana fragilis (Chemn.)
Astarte fusca (Poli)
Modiola modiolus (L)
Terebratula vitraea
Baguettes et test de Cicaridés

Dragage A 18 (chasseur 142) :

Macoma sp.
Pecten cf. *jacobaeus* L
Chlamys cf. *islandica* L
Chione (Chamelea) gallina L
Peplum subclavatum (cantr.)
Mytilus galloprovincialis LK var. *herculaea* Mts
Tapes (Polytapes) rhomboïdes (Penn.) = *edulis* (Chemn.)

Il faut ajouter *Neptunea contraria* L. dragué par PRUVOT à Fountain-dreau. *Modiola modiolus*, *Astarte sulcata*, *Mytilus galloprovincialis* var. *herculaea* sont des espèces froides, correspondant à la faune à *Cyprina islandica* draguée par PRUVOT et ROBERT dans les cailloutis du cap Creus

(1) Les déterminations sont dues à mon savant collègue M. Pierre MARIE, chef du service des Foraminifères au B.R.G.G.

et considérée comme sicilienne. Nous avons vu que, en raison du faible recouvrement de vase et par comparaison avec les dragages des cañons du Georges-Bank, il convenait de les dater de la dernière époque froide, déterminée dans tous les carottages atlantiques ou méditerranéens par la microfaune à *Globigerina bulloides* et *Globigerina pachyderma*.

La dimension et la forme des graviers, beaucoup plus grands en moyenne que ceux du plateau continental, conduisent à penser qu'ils ont été transportés par un fleuve rapide. La faune des coquilles grises, toute vasicole, côtière, peut-être légèrement postérieure, quand elle est à nu; elle paraît dégagée de la vase par des courants sous-marins.

La presque identité des graviers du plateau continental et des cailloutis des rechs, au moins pour ce qui est des éléments crétacés, laisse supposer une communauté d'origine.

Le rech Lacaze-Duthiers aurait donc été creusé initialement au miocène, recreusé au pliocène supérieur (villafranchien), partiellement rempli à cette époque et au quaternaire ancien, enfin recreusé pendant les périodes d'émersion quaternaire et notamment de la dernière quand le plateau continental constitué par du miocène calcaire était une haute surface. Il n'est pas étonnant de trouver des vallées anti-quaternaires. Le Tech, la Têt et l'Agly sont tous les trois dessinés dès le rhodanien et envahis en rias, très profondément, par la transgression marine.

La seule nouveauté est d'admettre un grand plateau miocène au large des Pyrénées. Le synclinal de Leucate en offre un exemple réduit, très littoral et peu épais.

Une telle théorie contredit entièrement celle de PRUVOT, basée sur l'idée des tectoniciens, d'un prolongement de la chaîne pyrénéenne vers la Provence. Mais, comme le remarque STILLE, chaîne veut dire pour les tectoniciens, zone plissée et non montagnes et la topographie actuelle de la Méditerranée profonde avec ses grandes cuvettes simples et lisses n'est pas en faveur de cette idée de terriens.

Nous retiendrons enfin que la présence d'un cailloutis très roulé, d'origine lointaine, est en faveur d'un creusement du cañon dû à l'érosion fluviale (très importante et rapide en pays calcaire où l'écoulement peut être considéré comme forcé). Cette question sera discutée plus tard.

FAUNE DES SABLES DE BANYULS

TABLEAU I

Sables à Amphioxus : C. 43, — 30 mètres.

- Amphihelia oculata* (L.).
- Timoclea ovata* (Penn.).
- Callista chione* (L.).
- Pecten jacobaeus* (L.).
- Bolma rugosa* (L.).
- Crepidula Moulinsi* (Michard).
- Calliostoma (Ampillotrochus) granulatum* (Born).
- Lutraria lutraria* (L.).
- Laevicardium oblongum* (Chemnitz).
- Isocardia lunaria* (L.) (= *cor* L.).
- Capulus hungaricus* (L.).
- Lutraria* sp.
- Acanthocardia echinata* (L.) var. *mucronata* (Poli). (C'est la forme commune en Méditerranée.)

Sable coquillier : — 30 mètres.

- Leda pella* (L.).
- Nucula nucleus* L. (Com.).
- Pectunculus glycymeris* L.
- Barbatia (Arca) barbata* L. (juv.).
- Arca lactea* L.
- Anomia ephippium* L.
- Chlamys multistriata* (Poli).
- Chlamys varia* L. (juv.).
- Chlamys flexuosa* (Poli).
- Lima hians* (Gosselin).
- Cardium papillosum* (Poli).
- Chama gryphoides* L.
- Venus casina* L.
- Timoclea (Venus) ovata* (Penn.).
- Psammobia faroënsis* (Chemn.).
- Mactra subtruncata* Da Costa (noircis).
- Loripes lacteus* L.
- Tellina pulchella* L.

- Emarginula elongata* O.-G. Costa.
- Halistes lamellosa* Lk.
- Calliostoma exasperata* Pennant.

Turbo rugosus L. (fragments jaunis).
Phasianella tenuis (Mich.).
Rissoa cimex L.
Rissoa cancellata O.-G. Costa.
Rissoa variabilis v. Müll.
Rissoina Bruguieri Payr.
Turritella communis Risso.
Triforis perversum L.
Bittium reticulatum Da Costa (très com.).
Nassa pygmaea Lk.
Murex Blainvillei Payr.
Marginella miliaria L.
Mitra tricolor Gosselin.
Actaeon tornatilis L. (juv.).
Scaphander lignarius L.

A 4 : — 105 mètres.

Polynices (Natica) Alderi Forbes.
Timoclea (Venus) ovata Pennant.
Circe (Gouldia) minima Mtg.

Vase sableuse E. — 92 mètres.

Venus fasciata D.C. var. *scalaris* Bronn.
Nucula nucleus L.

Vase sableuse F. — 92 mètres.

Calyptraea sinensis L.
Trophon muricatus Mtg.
Dentalium inaequicostatum Dautz.
Nucula sulcata Bronn.
Leda fragilis Chemnitz.
Timoclea (Venus) ovata Penn.
Circe (Gouldia) minima Mtg.
Varicorbula (Corbula) gibba Olivi, var. *curta* Loc.

Sable vaseux G. — 95 mètres.

Polynices catena D.C.
Chlamys opercularis L. juv.
Timoclea (Venus) ovata Penn.

Vase sableuse H. — 90 mètres.

Turritella triplicata Broc. fragment.
Timoclea (Venus) ovata Pennant.

Vase sableuse I. — 90 mètres.

- Turritella triplicata* Broc. fragment.
- Nucula sulcata* Bronn.
- Timoclea (Venus) ovata* Penn.
- Mysis undata* Penn.
- Solenocurtus antiquatus* Pult.
- Varicorbula (Corbula) gibba* Olivi, var. *curta* Loc.

Vase sableuse K. — 90 mètres.

- Turritella communis* Risso.
- Timoclea (Venus) ovata* Penn.
- Mysis undata* Phil.
- Venus faciata* D.C., var. *scalaris* Bronn.

A 18 : — 780 mètres

Coquilles mortes :

- Macoma* sp.
- Pecten* cf. *jacobaeus* (L.).
- Chlamys* cf. *islandica* (L.).
- Chione (Chamelea) gallina* (L.).
- Peplum* cf. *subclavatum*.
- Mytilus galloprovincialis* (Lk.) var. *herculea* Mtrs.
- Tapes (Polititapes) rhomboides* (Penn.) = *edulis* (Chemn.).

Coquilles vivantes :

- Nucula nucleus* (Lin.).
- Nuculana sulcata* (Bronn.).
- Striarca koreni* (Davids.).
- Bathyarca pectunculoïdes* (Le.).
- Barbatia (Plagiarca) nodulosa* (Müll.).
- Timoclea ovata* (Penn.).
- Pitar pectunculus* (Broc.) = *mediterranea* (Tiberi). (Espèce rare succédant à une forme pliocène.)
- Circe (Gouldia) minima* (Mtg.).
- Varicorbula gibba* (Olivi).
- Trophon (Pajodula) carinata* (Borsone).

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE

- SHEPARD. — *Submarine Geology*. New York 1948.
- KUENEN. — *Marine Geology*. New-York 1950.
- BOURCART. — *Le Plateau Continental*. Congrès d'Alger 1952.
- *Le Fond des Océans*. Presses Universitaires de France 1954.

COMPOSITION DES VASES DU PLATEAU CONTINENTAL

CO³ Ca

	BANYULS	MARSEILLE W.	MARSEILLE E.	NICE	VILLEFRANCHE
S. C.	6 éch. (- 5) — 19,5 — (+ 9)				
V. C.	23 éch. (- 15,5) — 35,5 — (+ 33)				
S. L.	20 éch. (- 22) — 33 — (+ 32)		9 éch. (- 36) — 75 — (+ 21)		
V. L.	6 éch. (- 6,5) — 32 — (+ 15,5)	10 éch. (- 8) — 50 — (+ 15)		1951 10 éch. (- 14) — 53,6 — (+ 11) 1952 33 éch. (- 10) — 51,8 — (+ 7)	1952 44 éch. (- 16) — 58 — (+ 11) 1953 25 éch. (- 5) — 49 — (+ 5)

M. O.

	BANYULS	MARSEILLE W.	MARSEILLE E.	NICE	VILLEFRANCHE
S. C.	6 éch. (- 5) — 6,5 — (+ 16)				
V. C.	18 éch. (- 3,5) — 4 — (+ 7)				
S. L.	16 éch. (- 5) — 6,5 — (+ 20)				
V. L.	6 éch. (- 4) — 5,5 — (+ 2)	7 éch. (- 1) — 5 — (+ 1,5)		1951 5 éch. (- 1,4) — 4,7 — (+ 4) 1952 35 éch. (- 2) — 2,4 — (+ 4,5)	1952 11 éch. (- 2) — 4 — (+ 7) 1953 25 éch. (- 3) — 6 — (+ 8)

N

	BANYULS	MARSEILLE W.	MARSEILLE E.	NICE	VILLEFRANCHE
S. C.					
V. C.	11 éch. (- 0,45) - 0,51 - (+ 0,95)				
S. L.	7 éch. (- 0,08) - 0,14 - (+ 0,07)				
V. L.	5 éch. (- 0,21) - 0,30 - (+ 0,68)	7 éch. (- 0,01) - 0,11 - (+ 0,01)		1951 5 éch. (- 0,01) - 0,03 - (+ 0,03) 1952 30 éch. (- 0,02) - 0,04 - (+ 0,02)	1952 4 éch. (- 0,008) - 0,043 - (+ 0,003) 1953 23 éch. (- 0,02) - 0,05 - (+ 0,04)

C/N

	BANYULS	MARSEILLE W.	MARSEILLE E.	NICE	VILLEFRANCHE
S. C.					
V. C.	9 éch. (- 15) - 16 - (+ 24)				
S. L.	7 éch. (- 14,5) - 24 - (+ 23,5)				
V. L.	5 éch. (- 24) - 27 - (+ 9)	7 éch. (- 3) - 22 - (+ 4)		1951 4 éch. (- 33) - 56,6 - (+ 41) 1952 30 éch. (- 25) - 26 - (+ 46)	1952 4 éch. (- 30) - 51 - (+ 49) 1953 24 éch. (- 27) - 54 - (+ 36)

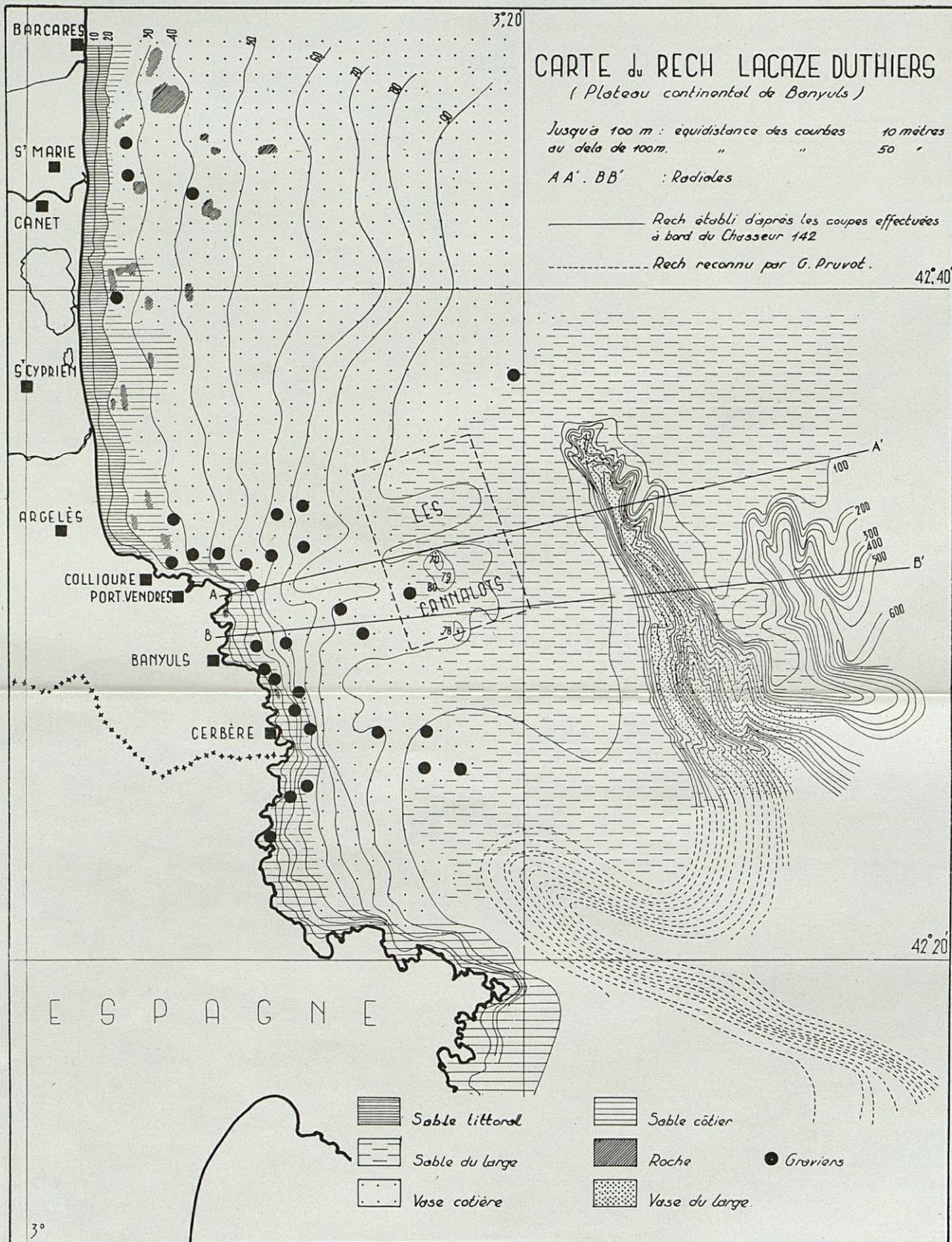


Planche I

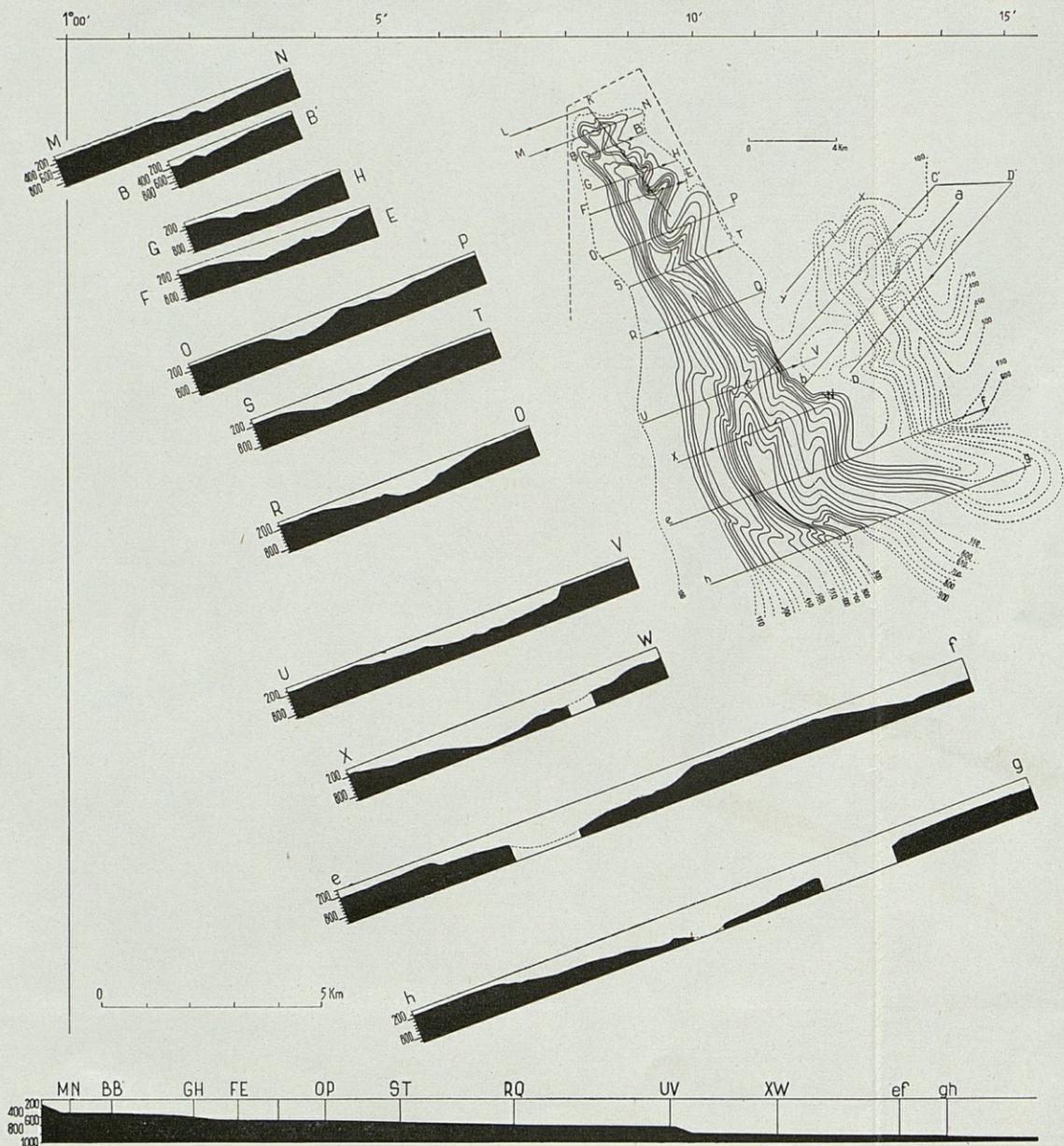


Planche II. — Cartes et coupes transversales et longitudinales du Rech Lacaze-Duthiers sans exagération des hauteurs.

