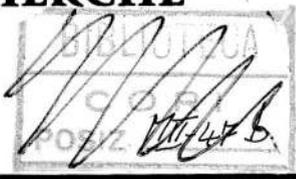


Ing. Franco Quarta

Federico Barneba N. 10

sédimentolo

SÉDIMENTOLOGIE ET RECHERCHE DE PÉTROLE (*)



r. passega

Géologue conseil, Bartlesville, Oklahoma, U. S. A.

La sédimentologie n'a pas la place qui devrait lui revenir dans la recherche du pétrole. Celle-ci reste une étude structurale poussée, de sédiments souvent mal connus. La cause en est, au moins en partie, que l'on a trop demandé à l'étude de sédiments récents dans lesquels on a cherché l'image souvent introuvable des sédiments anciens. Le remède est l'étude directe des sédiments anciens et la formation d'hypothèses sur leur mode de transport et de dépôt qui peuvent être vérifiées dans le grand laboratoire des mers actuelles. L'objectif est de préciser les facteurs de la sédimentation et en particulier la paléobathymétrie qui est souvent le sujet des opinions les plus opposées.

La découverte de relations entre ces facteurs ainsi précisés et les caractéristiques pétrolières des sédiments peut servir de guide à la recherche du pétrole.

Sedimentology does not have the place it should deserve in petroleum exploration. Exploration remains an advanced structural study of poorly known sediments. The cause is, at least to a certain extent, that too much has been expected from the investigation of recent sediments. Sedimentologists have searched these sediments for the image of ancient sediments that generally does not exist. A remedy is the direct study of ancient sediments and the formulation of hypotheses about their transportation and deposition that may be tested in the large laboratory formed by present oceans. The objective is to determine with accuracy sedimentation factors and particularly the depth of ancient seas, a frequent subject of controversies.

The discovery of relationships between sedimentation and petroleum characteristics of the rocks may serve as a guide to petroleum exploration.

La sedimentologia no ocupa la plaza que le corresponde en la busca del petróleo. Esta se resume a un estudio estructural detallado de sedimentos frecuentemente mal conocidos. La causa es, al menos parcialmente, que se ha exigido demasiado al estudio de sedimentos recientes en los cuales se ha buscado la imagen amenudo inhallable de los antiguos. El remedio consiste en el estudio directo de los sedimentos antiguos y la elaboración de hipotesis sobre su modo de transporte y de deposición que podrán verificarse en el gran laboratorio de los mares actuales. El objetivo es de precisar los factores de la sedimentación y en particular la paleobatimetría que frecuentemente es el sujeto de opiniones muy distintas.

El descubrimiento de relaciones entre estos factores así determinados y las características petrolíferas de los sedimentos puede servir de guía en la busca del petróleo.

La sédimentologie s'occupe de l'étude de la formation des sédiments. Comme le pétrole se forme et s'accumule dans ceux-ci, il semblerait naturel que la sédimentologie ait une place importante dans la recherche du pétrole, d'autant plus que l'accumulation est souvent limitée et contrôlée

(*) Les cartes extraites de rapports de l'Agip Mineraria sont publiées avec la permission de cette société. La Compagnie des Pétroles Total (Libra) a prêtée son concours à la préparation de cet article.

par des variations latérales de certains caractères des sédiments, et particulièrement de la perméabilité. Toutefois la sédimentologie, pour deux raisons, ne joue pas le rôle que l'on attendrait d'elle.

La première raison est que la méthode structurale d'exploration qui ne demande que des connaissances assez générales sur les sédiments donne d'excellents résultats. Un anticlinal et une série marine d'aspect favorable sont une justification suffisante pour un puits d'exploration. Les couches forment de multiples objectifs et les statistiques montrent qu'après un certain nombre de puits stériles, on trouve généralement un champ qui compense les frais de recherche.

La deuxième raison est que les résultats obtenus par la sédimentologie n'ont généralement pas une précision suffisante pour être utiles. Ceci est dû d'une part au nombre bien inférieur des points de contrôle dans une étude directe des sédiments par rapport à une étude géophysique et d'autre part au mode d'attaque des problèmes sédimentologiques.

La plupart des recherches sédimentologiques ont porté sur des sédiments récents et plus particulièrement sur les sédiments littoraux qui sont les plus abordables. Dans ces sédiments, on a cherché des modèles qui puissent être retrouvés dans les sédiments anciens. Les sédiments littoraux sont déposés par une grande variété d'agents : rivières, vagues se brisant pour former des plages, courants littoraux, courants dus aux marées ou aux vents, courants océaniques. Il s'ensuit qu'il est difficile de construire des modèles simples de dépôts littoraux. D'ailleurs, si l'on avait ces modèles, on n'aurait pas très souvent l'occasion de s'en servir car les dépôts littoraux se forment généralement en bordure des bassins et sont vulnérables à l'érosion ; ils sont donc assez rares dans les sédiments anciens.

Au cours de ces dernières années, les dépôts du talus de la plate-forme continentale et ceux des plaines abyssales ont été étudiés. Ces études ont apporté une contribution considérable à la compréhension de la sédimentation dans les fosses anciennes par courants de turbidité. Dans l'ensemble toutefois, ces mers profondes n'occupaient qu'une petite partie des zones où l'on cherche du pétrole.

Il semblerait que les conditions qui s'approchent le plus de celles des mers intérieures anciennes, étendues et peu profondes sont celles de la plate-forme continentale. Toutefois les études sédimentologiques de cette plate-forme se sont montrées assez peu utiles pour la compréhension des sédiments anciens parce que nous nous trouvons actuellement à une époque particulière. Par suite de la fonte des glaces quaternaires, le niveau des mers est monté rapidement et la profondeur de la plate-forme continentale est probablement plus grande que celle de la plupart des mers intérieures anciennes. Les sédiments apportés à la mer par les rivières se trouvent devant une sorte de vide et forment des cordons littoraux ou des deltas qui s'avancent sur la plate-forme ; cependant la plus grande partie de celle-ci est située près de la limite d'action des vagues et ne semble pas soumise à d'autres agents de transport de sorte qu'elle ne reçoit que peu de sédiments. Ainsi le projet API n° 51 a montré que, sur la plate-forme du golfe du Mexique, les sédiments récents n'ont que quelques mètres d'épaisseur et consistent surtout en sédiments remaniés du Pleistocène. De même la plate-forme continentale au sud de la France est recouverte de sables anciens.

Il est donc difficile de construire avec les sédiments récents des modèles des sédiments anciens. Ceci apparaît d'ailleurs quand on pense aux sables paléozoïques du Sahara qui devaient couvrir sur le fond des mers des centaines de milliers de kilomètres carrés ou à certaines couches de charbon des États-Unis que l'on peut suivre sur des centaines de kilomètres. Ces sédiments n'ont pas d'image aux temps actuels.

La sédimentologie des roches anciennes est donc forcée d'analyser directement la formation des dépôts anciens. Des hypothèses doivent être faites sur les procédés de transport et de dépôt. Les sédiments récents gardent cependant leur utilité, car ils forment un grand laboratoire dans lequel ces hypothèses peuvent être vérifiées. A titre d'exemple, STETSON (1938) a noté que sur la plate-forme continentale à l'est des États-Unis des sables grossiers et des graviers déposés au Pleistocène ont été remaniés et reclassés jusqu'à des profondeurs de 60 à 70 m par les vagues actuelles. Bien

que ces dépôts sableux ne soient pas à proprement parler des dépôts de l'océan actuel, ils donnent des informations précieuses sur la limite d'action des vagues de cet océan.

D'ailleurs certains sédimentologues orientent leurs études de sédiments actuels dans cette direction (VAN ANDEL 1958).

Quelles sont les méthodes d'attaque de ces problèmes des sédiments anciens ? Il faut tout de suite noter que les méthodes ne sont pas les mêmes que celles qui étudient les sédiments récents. Ces dernières peuvent disposer, surtout près des côtes, d'un grand nombre d'échantillons. Certains phénomènes peuvent être examinés en action. Les faunes sont vivantes, les réactions chimiques en cours. Par contre on a peu de connaissances sur la troisième dimension, car les carottes prises en mer n'ont que quelques mètres.

Dans l'étude des sédiments anciens, au contraire, les points de contrôle sont souvent plus limités et l'on n'a que le produit final des réactions qui peut avoir été entièrement changé par des diagenèses beaucoup plus récentes que le dépôt. D'autre part, on a le grand avantage d'avoir la troisième dimension. Les carottages conventionnels ou électriques permettent d'étudier la forme et l'étendue des dépôts et de suivre l'évolution de leur dépôt. Pour ces raisons, tandis que l'étude des sédiments récents est surtout une recherche de laboratoire, celle des sédiments anciens doit intégrer les recherches de laboratoire, celles de subsurface, de terrain et même de géophysique.

La méthode d'étude la plus classique est la détermination des milieux par les caractères lithologiques et paléontologiques des dépôts. Les concepts sont souvent anciens et peuvent avoir besoin d'être revus. Ce n'est que depuis quelques années que l'on s'est aperçu que les sables n'étaient pas seulement des dépôts littoraux mais pouvaient être déposés à plusieurs milliers de mètres de profondeur. Les évaporites sont généralement considérés comme des dépôts de mers très peu profondes. Toutefois, les couches de gypse très étendues du Miocène supérieur de la vallée du Pô ont par endroit au toit et au mur des argiles contenant des faunes de mer profondes (E. DI NAPOLI, communication personnelle, 1960). Un certain nombre de concepts seront sans doute modifiés quand on aura des indications bathymétriques précises sur les mers anciennes.

Certaines structures sédimentaires donnent des indications précises, particulièrement sur la direction de transport des sédiments. Ces indications peuvent être portées sur des cartes. POTTER et SIEVER (1956) ont fait des études statistiques de la direction des stratifications obliques de grès carbonifères de l'état de l'Illinois et des états voisins. La direction indiquée est assez constante sur de très vastes étendues. La direction des stratifications obliques du Paléozoïque en bordure du bassin de Polignac au Sahara semble elle aussi avoir une direction préférentielle.

TEN HAAF a relevé (1959) les *flow marks* laissés par les courants de turbidité dans la fosse de la formation *Marnoso-arenacea* entre Bologne et Florence. La direction des courants était constante et le remplissage de cette fosse parallèle à l'arc de l'Apennin se faisait longitudinalement à partir de son extrémité nord-ouest.

D'autres indications précises sur les caractéristiques des agents de dépôt des matériaux clastiques peuvent être données par les granulométries.

Une étude de sédiments récents et particulièrement de ceux du Mississipi a montré qu'une relation existait entre la texture des dépôts clastiques et les agents de dépôt. Si on représente chaque échantillon d'un dépôt par un point défini par deux paramètres des courbes granulométriques cumulatives, soit C le *onepercentile*, diamètre minimal du un pour-cent le plus grossier du sédiment qui est une valeur approchée du grain maximal, et M le médian, l'ensemble des points correspondant à un dépôt forme un diagramme dit CM qui caractérise l'agent de dépôt. La figure 1 est le diagramme CM le plus complet des dépôts de courants tractifs, c'est-à-dire de courants transportant les sédiments comme le fait une rivière. Chaque partie du diagramme correspond à un mode de transport différent (PASSEGA, 1957). Au centre, la partie QR représente des sédiments bien classés, transportés sur le fond en suspension dégradée, devenant plus fine de bas en haut. La

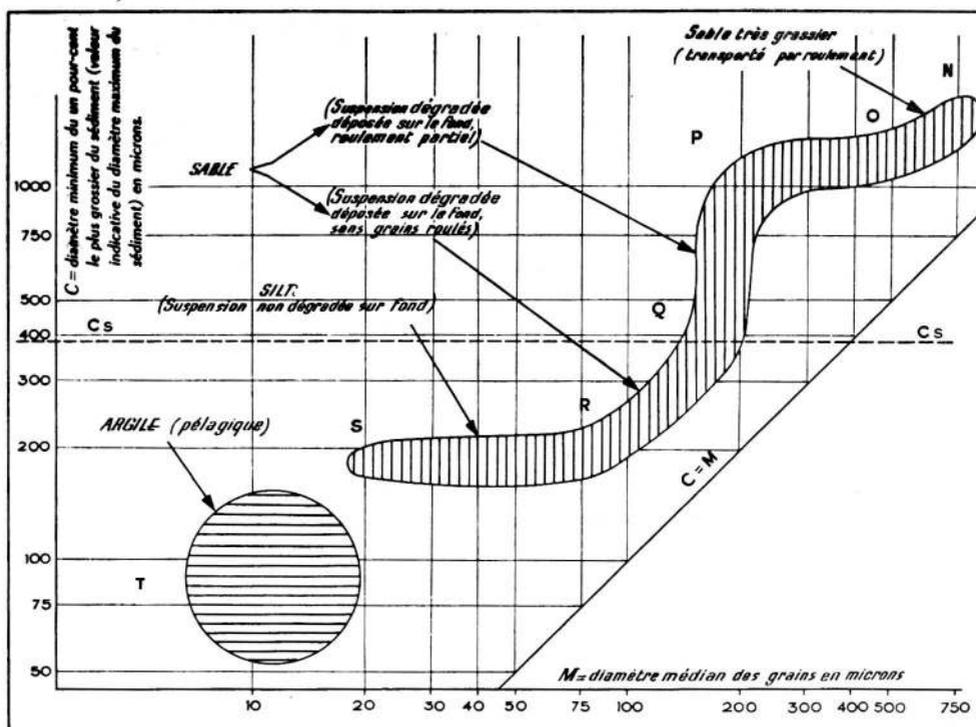


FIG. 1. — Exemple de diagramme CM complet de dépôts de courants tractifs.

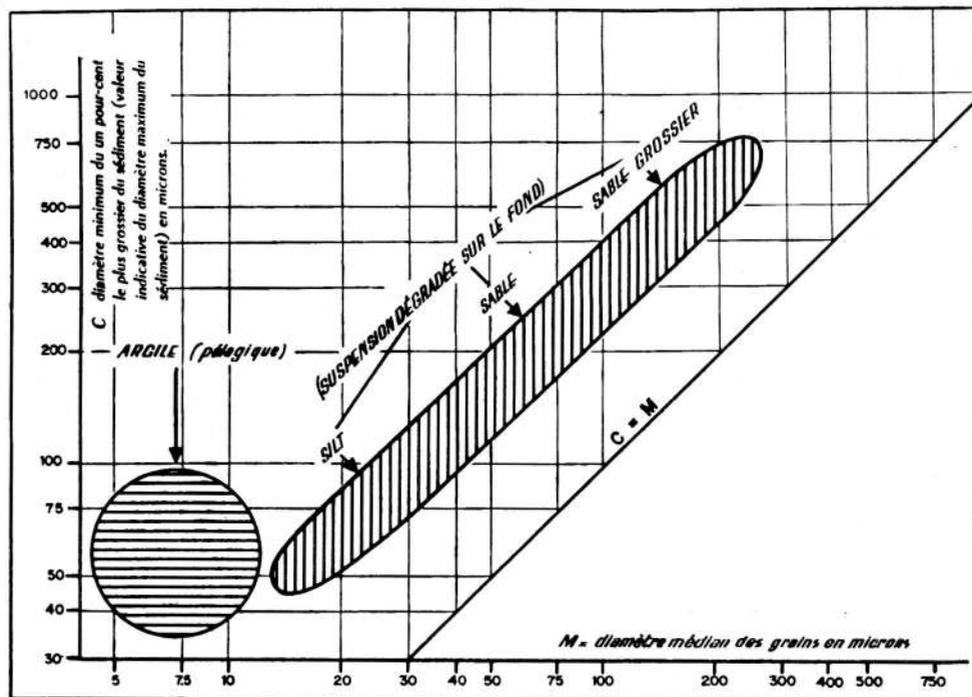


FIG. 2. — Exemple de diagramme CM de dépôts de courants de turbidité (tractifs).

partie RS correspond à une suspension non dégradée, presque uniforme un peu au-dessus du fond. La partie PQ représente un sédiment transporté en suspension comme celui du point Q mais avec quelques grains roulés. Dans la partie PO, la proportion des grains roulés augmente et le segment ON correspond presque uniquement à un dépôt de grains roulés. La partie T représente les argiles pélagiques déposées en eau calme.

La valeur C_s de C pour le point Q est approximativement le diamètre du grain maximal transporté en suspension juste après que, par ralentissement du courant, tout roulement a cessé ; elle est un indice de la turbulence maximale du courant tractif.

La figure 2 est le diagramme d'un dépôt de courant de turbidité et des couches d'argile interstratifiées. Le diagramme ressemble à la partie QR du diagramme précédent et représente un transport par suspension dégradée sur fond.

Les indications granulométriques peuvent être portées sur des cartes et se prêtent à la reconstruction de la sédimentation dans un bassin.

Quels sont les résultats de ces études ? Un premier résultat général a été de montrer que les sédiments anciens sont le plus souvent beaucoup plus uniformes que les sédiments littoraux modernes. Par exemple, près de Bologne, la *Marnoso-arenacea*, sur près de 3 000 m d'épaisseur, est formée par une série monotone de grès interstratifiés avec des argiles ayant tous même direction de *flow marks* et mêmes diagrammes CM. Seulement, dans la partie supérieure de la série, la sédimentation évolue et les turbidites sont remplacées par des dépôts de courants tractifs puis par des évaporites.

Le plus souvent, les dépôts de courants tractifs ont eux aussi des caractéristiques assez constantes ou variant uniformément tant horizontalement que verticalement. Ils se prêtent donc bien à des études.

Un type de dépôt de courants tractifs très commun dans les sédiments anciens est constitué par des couches de sable qui couvraient sur de très grandes étendues le fond des mers anciennes. Ni les courants de marées qui agissent avec vigueur sur le fond de la mer seulement près des côtes ou sur des bancs sous-marins où ils sont restreints par la topographie, ni les courants du type océanique ne peuvent expliquer l'étendue et l'uniformité latérale de ces dépôts sableux. Il semble donc logique de les attribuer aux vagues agissant en eau assez peu profonde. Ce mécanisme du transport par vagues peut être conçu ainsi.

Les particules de l'eau de surface agitée par les vagues décrivent une orbite à peu près circulaire. Le diamètre des orbites diminue quand la profondeur de l'eau augmente. Si le fond est dans la zone d'action des vagues, l'orbite s'aplatit vers le bas pour devenir un segment de droite sur le fond.

Si les vagues ont assez de force pour transporter du sable sur le fond, les grains ont un mouvement alternatif. Une petite différence entre mouvement aller et retour peut causer la dispersion graduelle du sable sur des surfaces très étendues.

Les facteurs principaux du transport par vagues en un point du bassin sont schématisés sur la figure 3.

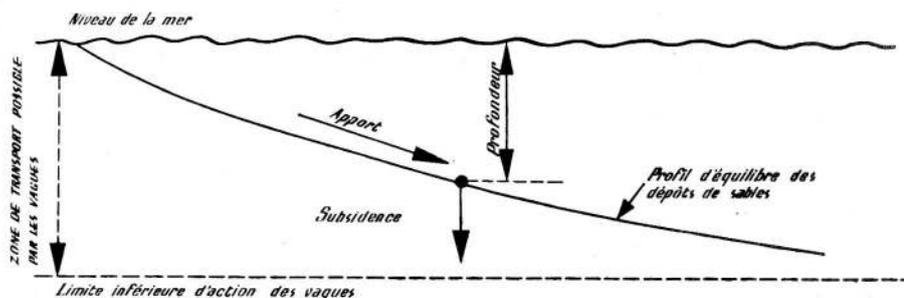


FIG. 3. — Principaux facteurs du transport du sable par les vagues.

Ce sont :

- 1) l'apport de sédiments ;
- 2) la subsidence ;
- 3) la profondeur de l'eau.

Si ces facteurs sont en équilibre, la surface du sable forme un profil d'équilibre presque horizontal. Si l'équilibre est dérangé par une augmentation de l'apport, la profondeur de la mer diminue et l'action des vagues augmente ; il s'établit alors un nouveau profil d'équilibre.

Une augmentation temporaire de l'apport se traduit par une langue de sédiments qui s'étale vers le large.

La turbulence maximale de l'eau due aux vagues diminue avec l'augmentation de la profondeur de la mer. La valeur C_s (diamètre approximatif du grain maximal transporté en suspension), qui peut être lue sur le diagramme CM, est un indice de cette turbulence et peut donc donner une idée, tout au moins relative, de la profondeur de l'eau. A l'*Agip Mineraria*, une étude des sédiments du Pliocène et du Miocène de la vallée du Pô est en cours pour caler une échelle granulométrique des profondeurs de la mer par des déterminations paléocéologiques (BUSI et CHERICI, 1960). Les premiers résultats sont illustrés par la figure 4. Les segments horizontaux représentent les intervalles

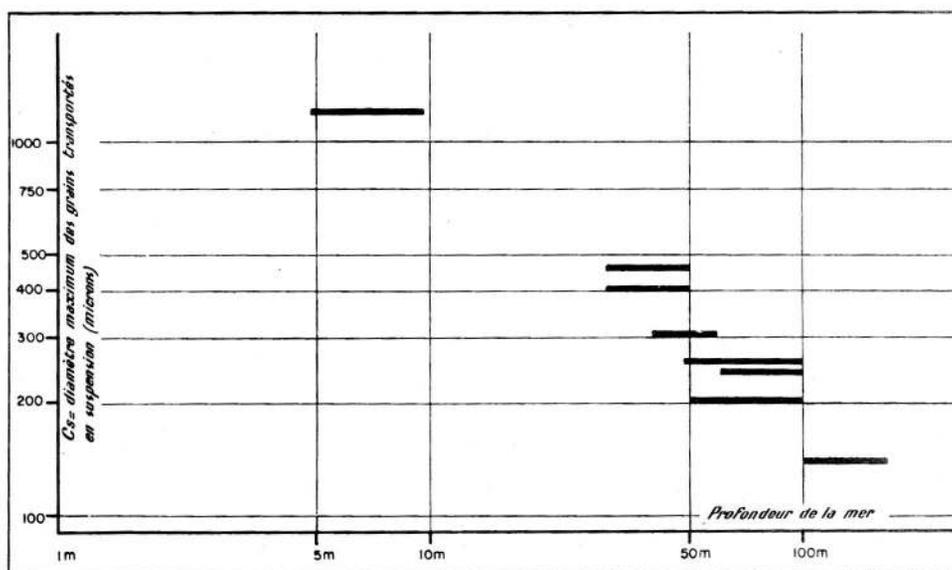


FIG. 4. — Diagramme granulo-écologique pour l'estimation de la profondeur des mers du Pliocène et du Miocène de la vallée du Pô (Italie).

— intervalles de profondeur indiqués par l'écologie.

de profondeur estimés d'après les faunes. On peut voir que ces segments s'ordonnent bien et semblent par suite confirmer l'hypothèse émise sur la signification de C_s . Les profondeurs maximales d'action des vagues arrivent à près de 100 m. A cette profondeur, les sédiments transportés sont des silts. Il n'existe malheureusement presque aucune donnée sur l'action des vagues dans les mers modernes qui puisse être comparée à ces résultats. Dans ces mers, les sédiments sont souvent fins, non parce que les vagues ne peuvent pas transporter des sédiments plus grossiers, mais parce que

l'apport est fin. Toutefois, l'étude par STETSON (1938) du remaniement par les vagues de sédiments pleistocènes grossiers indique des profondeurs d'action des vagues atlantiques supérieures à celles estimées pour les mers pliocène et miocène de la vallée du Pô.

La figure 5 montre une tentative de reconstruction de la bathymétrie de la mer du Tortonien (Miocène) entre Parme et Milan (VEZZANI et BUSI, 1960). La profondeur de dépôt des sables a été établie par granulométrie et paléécologie, celle de l'argile par paléécologie. Le champ de Cortemaggiore, où ces couches sont productives de gaz et d'huile, est un anticlinal situé dans la

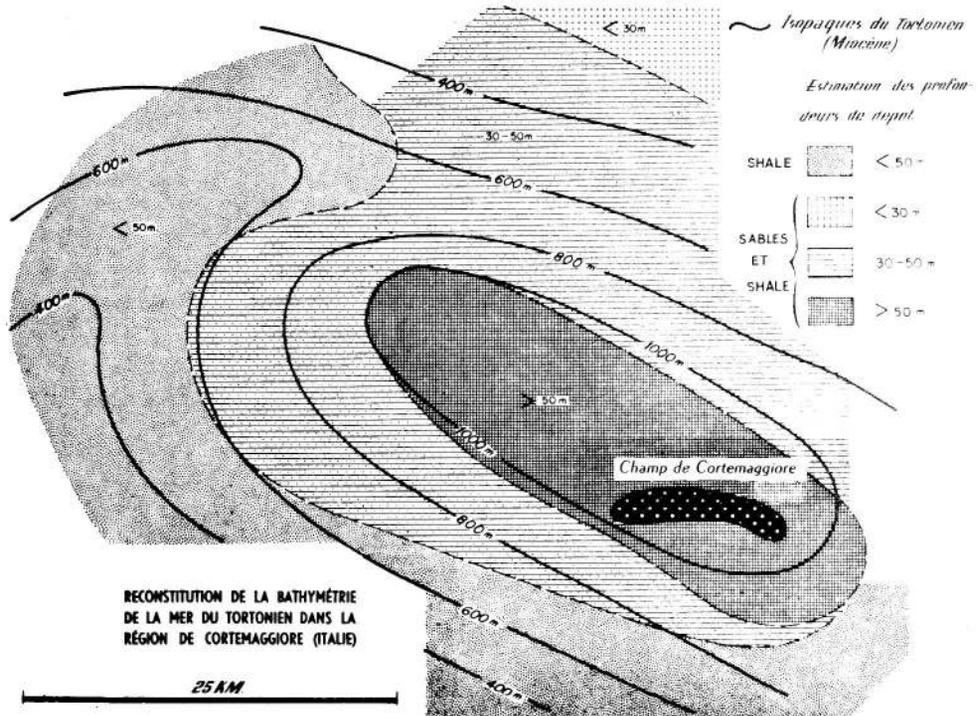


FIG. 5.

partie profonde de la cuvette. La bande d'argile au sud semble s'être déposée à une profondeur moins grande que celle des sables. C'est un fait très commun dans la plaine du Pô ; il est attribué à ce que les couches d'argile déposées pendant les périodes calmes résistent mieux à l'érosion que les sables. Si une partie du bassin se trouve au-dessus du profil d'équilibre de dépôt des sables, ceux-ci ne se déposent pas ou sont érodés, tandis que l'argile résiste à l'érosion. De nombreux *pinch-outs* productifs sont de ce type. Ces *pinch-outs* ne sont pas d'anciennes lignes de plage, comme on pourrait le penser, mais ils sont contrôlés par le profil d'équilibre des sables et donc par la bathymétrie. Ces *pinch-outs* peuvent être situés à des distances considérables des côtes et même à une certaine profondeur.

Les études bathymétriques peuvent parfois permettre de reconnaître des hauteurs topographiques sous-marines, dues à des structures actives pendant la sédimentation. Ces structures sont intéressantes, car elles existaient avant la migration des hydrocarbures et ont par suite plus de chance d'avoir formé un piège que des structures trop récentes.

La figure 6 montre une application de la sédimentologie. Les couches de sables du Pliocène basal de la vallée du Pô entre Milan et Brescia forment un manteau perméable terminé au nord par un *pinch-out*. La position de ce *pinch-out* est en certains points déterminée par les puits et les sections sismiques. La reconstruction de la ligne a été faite en prenant comme hypothèse que le *pinch-out* était une ligne bathymétrique continue de la mer pliocène. L'orogénèse alpine a soulevé vers le nord cette ligne qui a ainsi la possibilité de former des pièges stratigraphiques.

La figure 7 est une coupe du champ de Bisti, New Mexico, un *shoestring* presque rectiligne. La coupe est divisée en trois parties, I, II, III.

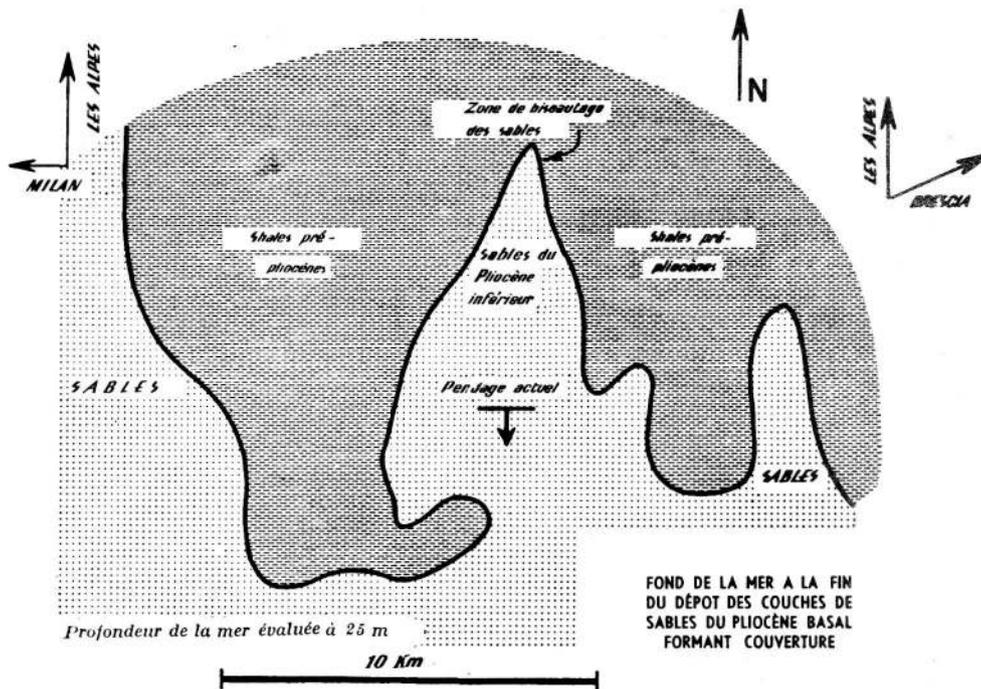


FIG. 6.

Les sables de la partie I, qui constituent le réservoir, atteignent souvent 1 mm de diamètre et sont propres. Les grains de la partie II peuvent atteindre 1 mm, mais ils sont englobés d'argile qui détruit la perméabilité. En III, les sédiments sont très fins. L'interprétation de la sédimentation est la suivante : le réservoir a été formé près de la base d'action des vagues. En II, les sédiments grossiers passaient, tandis qu'en III, sous la base d'action des vagues, ils ne pouvaient être transportés. Ils s'accumulaient donc en I. La valeur de C_s confirme que l'eau était relativement profonde (de l'ordre de 80 m). La différence entre les granulométries des parties II et III pourrait permettre de déterminer la position de la zone I si des puits stériles ont été forés de part et d'autre.

Passons brièvement à l'accumulation. Dans des zones étendues de bassins sédimentaires, les accumulations d'hydrocarbures ont souvent des caractéristiques assez constantes. Par exemple, dans certaines zones, tous les gisements sont des champs de gaz. Dans d'autres zones étendues, on ne trouve aucun gisement d'hydrocarbures, bien que la série marine soit en apparence favorable. Ces conditions ne sont certainement pas dues à des arrangements délicats d'une multitude de facteurs,

car elles s'étendent parfois à tout le bassin. Ce sont donc des causes peu connues qui toutefois sont générales.

Étant donné que la sédimentation dans les mers anciennes est souvent plus simple que l'on ne pensait et que l'on semble pouvoir la définir au moins dans ses grandes lignes par quelques paramètres, ne pourrait-on pas utiliser ceux-ci pour rechercher certaines de ces causes générales? Des études de ce genre sont en cours dans les laboratoires de l'Agip Mineraria.

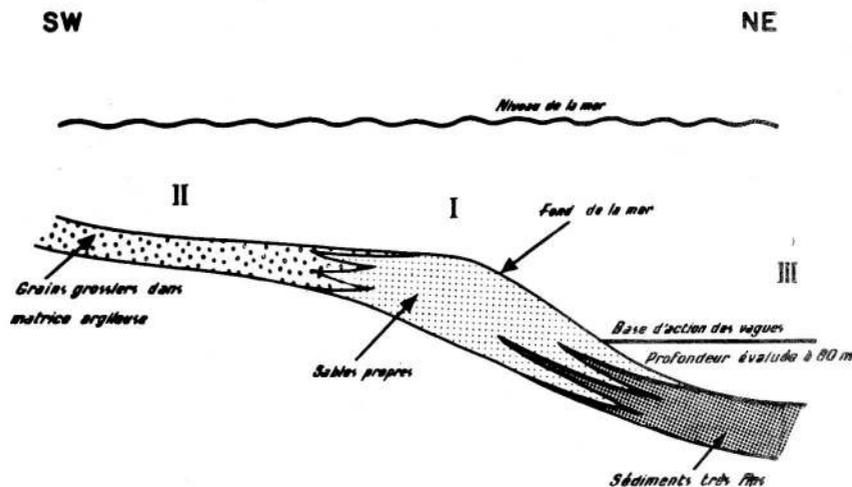


FIG. 7. — Coupe schématique du champ de Bisti pendant le dépôt des sédiments.

NEGLIA et PASSEGA (1960) ont noté, dans certains sédiments pliocènes et miocènes de la vallée du Pô, que des hydrocarbures semblaient avoir été piégés par les carbonates au moment du dépôt et que la composition de ces hydrocarbures semblait liée à la profondeur de la mer ancienne. Le rapport méthane-éthane est élevé dans certains sédiments déposés par les vagues à une trentaine de mètres de profondeur et peu élevé dans des dépôts profonds de courants de turbidité. Par la suite, PASSEGA et VEZZANI (1960) ont montré que, pour les sables pliocènes et miocènes déposés par les vagues dans la vallée du Pô, ce rapport méthane-éthane diminue d'une manière continue à mesure que la profondeur de la mer augmente pour atteindre une valeur minimale à une profondeur de 50 m environ. Ils ont aussi commencé une étude statistique de formations de différentes parties du monde dont on peut déterminer la profondeur de dépôt et qui sont à la fois roches-mères et roches-réservoirs. La vingtaine d'exemples jusqu'à présent étudiée indique qu'une profondeur de mer de 40 à 50 m semble être une condition nécessaire pour la formation et l'accumulation de pétrole dans ces formations. Le résultat est d'ailleurs en partie intuitif car la matière organique peut difficilement être conservée dans une eau peu profonde où l'agitation apporte sans cesse de l'oxygène.

Il semble donc presque certain que la paléobathymétrie, par son action sur la décomposition de la matière organique, est un des facteurs importants de la formation de gisements pétrolifères.

En conclusion, la sédimentologie doit savoir reconnaître les problèmes d'exploration et adapter ses méthodes à ces problèmes. Pour cela, elle doit utiliser toutes les techniques qui donnent des informations sur les sédiments anciens : laboratoire, terrain, subsurface et même sismique, sans perdre de vue les sédiments récents. Enfin, elle doit fournir des données utiles. Au stade actuel de la recherche, les objectifs semblent pouvoir être les suivants :

1) En précisant les facteurs de la sédimentation, dont la profondeur de la mer, facteur aussi important que mal connu, préciser les études paléogéographiques. Construire en particulier des cartes paléobathymétriques. Ces reconstructions peuvent même donner des informations tectoniques en indiquant par exemple la position d'origine de dépôts sédimentaires allochtones déplacés par orogénèse. Ces études régionales peuvent être faites même quand les points de contrôle (affleurements et sondages) sont peu nombreux. Elles devraient être le complément obligatoire de toute étude géologique ;

2) Trouver les relations entre les caractéristiques pétrolières des sédiments et les facteurs de la sédimentation et en particulier la paléobathymétrie. Préciser ainsi l'évaluation des possibilités pétrolières des sédiments et obtenir un fil conducteur qui dirige l'exploration vers les parties d'un bassin où les conditions des sédiments sont les plus favorables. Ces études peuvent, elles aussi, être faites à l'échelle régionale même si le nombre des points de contrôle est petit ;

3) Reconstruire la formation de dépôts sédimentaires et trouver des relations entre la forme de ces dépôts, la topographie sous-marine et la structure. Obtenir ainsi un fil conducteur pour la recherche de pièges stratigraphiques. Ces études nécessitent de nombreux points de contrôle et des levés sismiques de détail.

Manuscrit reçu en septembre 1960.

BIBLIOGRAPHIE

- BUSI (M. T.) et CHERICI (M. A.). — Tentativo di Stima delle Profondità di Mari Antichi. Rapport de l'*Agip Mineraria*, San Donato Milanese, Italie, 1960.
- NEGLIA (S.) et PASSEGA (R.). — Deposition, Clay Mineral and Hydrocarbon Relationships, Po Valley, Italy. Présenté pour publication dans le *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1960.
- POTTER (P. E.) et SIEVER (R.). — Basal Pennsylvanian Sediment Sources of the Eastern Interior Basin : Part I. Cross-Bedding. *J. Geol.*, 1956, **64**, 3, 225-244.
- PASSEGA (R.). — Texture as Characteristic of Clastic Deposition. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol.*, 1957, **41**, 9, 1952-1984.
- PASSEGA (R.) et VEZZANI (F.). — La Profondità del mare, fattore della genesi degli idrocarburi. *Rapport de l'Agip Mineraria*, San Donato Milanese, Italie, 1960.
- STETSON (H. C.). — The Sediments of the Continental Shelf off the Eastern Coast of the United States. Papers in Physical Oceanography and Meteorology. *M. I. T and Woods Hole Ocean. Inst.*, juil. 1938.
- TEN HAAF (E.). — Graded Beds of the Northern Apennines. Sedimentary Structures and Direction of Supply. *Thèse de l'Université de Groningen*, Pays-Bas, 1959.
- VAN ANDEL (T. H.). — Application of Recent Sediment Studies to the Interpretation of Ancient Deposits. *Eclogae geol. Helv.*, 1958, **51**, n° 3.
- VEZZANI (F.) et BUSI (M. T.). — Sedimentologia del Tortoniano nella Pianura Padana. *Rapport de l'Agip Mineraria*, San Donato Milanese, Italie, 1960.