V. — LES MINÉRAUX LOURDS SUR LE PLATEAU CONTINENTAL DU GOLFE DE GASCOGNE

V.1. — Evolution des idées sur les minéraux lourds.

Bibliographie sommaire.

L'étude des espèces cristallines denses ($d = 2,90$) se poursuit depuis presque un siècle. Il n'est donc pas question, même en se limitant aux travaux océanographiques, de citer ici tous les écrits qui s'y rapportent. L'examen de la bibliographie existante permet heureusement de regrouper les auteurs par écoles, ou du moins par affinités. Aussi, nous nous attacherons avant tout à montrer dans quel esprit les chercheurs successifs ont abordé le problème des minéraux lourds, plutôt que de nous astreindre à dresser une liste plus ou moins complète de publications.

Schématiquement, l'histoire de l'étude des minéraux lourds nous paraît être passée par les phases suivantes :

V.1.1. — L'ÉPOQUE DES PRÉCURSEURS (1890-1930).

Les premières études furent réalisées à peu près simultanément en France (J. THOULET, 1902), en Italie (ARTINI, 1896) et en Hollande (J. W. RETGERS, 1895). J. THOULET fut le premier à entreprendre la recherche de liqueurs denses susceptibles de séparer les minéraux lourds de la fraction siliceuse. Les travaux réalisés à cette époque étaient surtout descriptifs et qualitatifs.

De nos jours, la détermination du cortège minéralogique d'un sable a presque toujours pour but de rechercher la provenance de celui-ci. On admet implicitement que les espèces denses proviennent, comme le sable qui les renferme, de la désagrégation des roches cristallines par les agents d'érosion. Ainsi, le produit du ravinement des montagnes finit-il en mer par l'intermédiaire des ruisseaux puis des fleuves.

Si dans une région donnée, les sédiments déposés sont dus au mélange d'apports de deux massifs cristallins, les minéraux lourds témoigneront de cette

dualité d'origine, pour peu que les deux zones émettrices aient des cortèges distincts.

Mais au début du siècle, le côté utilitaire des minéraux lourds n'apparaissait pas encore clairement, et l'examen des diverses espèces cristallines constituait plus une fin en soi qu'un moyen d'interprétation.

Très vite cependant vint le souci d'exprimer par un ordre de grandeur la fréquence des espèces cristallines. C'est ainsi que THOULET les notait A.A. (assez abondantes, R (rares) etc. Ce procédé fut utilisé en France jusque vers 1930, entre autres par A. CHEVALIER (1914), L. CAYEUX (1919), L. BERTHOIS et L. DANGEARD (1929) (1).

En Angleterre, des travaux comparables étaient réalisés, mais suivant un esprit un peu différent. Alors que les chercheurs français « recensent » les minéraux des roches cristallines et des sédiments, les auteurs britanniques, sous l'impulsion de A. BRAMMAL (1928) étudient plutôt l'évolution d'un minéral donné, son usure progressive par exemple, à mesure que l'on s'éloigne de sa source originelle.

V.1.2. — L'ÉPOQUE DES THÉORICIENS (1930-1950).

A partir de 1930 commence l'étude raisonnée du comportement des minéraux lourds, basée sur leurs propriétés physico-chimiques.

V.1.2.1. — L'école hollandaise.

Il semble que ce soit C. H. EDELMAN (1931) qui le premier ait réalisé une étude sédimentologique basée sur l'examen systématique de la répartition des espèces cristallines. Les résultats obtenus amènent l'auteur à définir deux notions importantes :

1) La province sédimentaire : celle-ci « est formée par une ensemble de sédiments constituant une *unité naturelle*, par l'âge, l'origine et la distribution ».

2) Le non classement des minéraux lourds : une province sédimentaire est caractérisée par un (le plus

(1) Pour les références concernant les articles antérieurs à 1930, le lecteur voudra bien se reporter aux publications de L. BERTHOIS (1935), SINDOWSKY (1949) et TGH. VAN ANDEL (1950) qui en donnent une liste très complète.

souvent) ou plusieurs cortèges minéralogiques. La dispersion des espèces cristallines au sein d'une province est uniforme. Les variations locales du cortège sont le seul fait du hasard.

Ces deux définitions demandent quelques développements. Selon EDELMAN, l'ensemble du matériel détritique résultant d'une même phase sédimentaire constitue une entité. Tout se passe comme si le dépôt se stabilisait en une seule fois, sans aucun tri interne. Ainsi s'explique l'absence de classement des minéraux lourds.

Ces unités gardent leur individualité non seulement dans l'espace, mais aussi dans le temps. Un changement important des conditions de dépôt provoquera la formation d'une nouvelle province, indépendante et distincte de la précédente.

Ainsi, EDELMAN conçoit un bassin sédimentaire, ou tout milieu ouvert en général, comme formé d'une mosaïque d'éléments simples situés côte à côte ou juxtaposés, mais ne se mélangeant pas entre eux.

Ces notions fondamentales ont été reprises par toute une école de chercheurs hollandais. Citons F. A. VAN BAREN (1934) puis BAAK (1936) qui étudie les sédiments de la mer du Nord. Puis, CROMMELIN R. D. (1943) examine ceux de la mer des Wadden, aidé par J. I. S. ZONNEVELD (1947). T. G. H. VAN ANDEL enfin, étudie successivement les sédiments du Rhin (1950), de la Durance (1951) puis la célébrité le conduit aux Etats-Unis où il continue de travailler selon les mêmes méthodes. Ceci explique pourquoi les études de minéraux lourds publiées aux Etats-Unis sont strictement dans la ligne de l'école hollandaise. Citons parmi les travaux récents traités dans le même esprit, concernant le plateau continental ceux de : D. M. POOLE (1958) sur la côte du Texas, T. G. H. VAN ANDEL et POOLE (1960) sur le golfe de Mexico, IMBRIE et VAN ANDEL (1964) enfin, sur la baie de Californie.

V.1.2.2. — Objections, critiques et opposition

Les méthodes de l'école de WAGENINGEN ont été reprises par l'ensemble des chercheurs européens. Cependant, leur application n'alla pas sans un certain nombre d'objections de la part des utilisateurs.

Dès 1933, sous l'influence de RUBEY, une autre conception des phénomènes prend corps. Cet auteur fait remarquer que le sédiment se modifie au cours du transport. Ainsi, deux sables ayant même origine mais ayant connu un destin différent auront des cortèges minéralogiques distincts. D'autre part, des ana-

lyses fractionnées lui montrent que la nature du cortège est en relation avec la granulométrie du sédiment. RUBEY est alors amené à n'étudier les minéraux que dans des limites très étroites: la première (635-125 microns) est invariable. La seconde est située à mi-distance entre le mode principal et la plus petite taille de la fraction siliceuse.

En 1934, L. THIEBAUT, en France, affirme qu'il n'est pas logique d'admettre que le transport des minéraux de grande taille puisse s'interpréter sans tenir compte de leurs caractéristiques physiques. Il établit le « principe de l'équivalence », selon lequel un grain de forte densité a même comportement qu'un grain de quartz de plus grande taille.

En 1937, RUSSEL reprend les mêmes principes pour étudier les dépôts deltaïques du Mississipi. Pour lui également, la dynamique a autant d'importance que l'origine.

En France également, on travaille dans cette optique.

En 1943, B. BRAJNIKOV et S. DUPLAIX montrent que la méthode de comptage adoptée par les chercheurs hollandais n'est pas quantitative. En effet, ceux-ci étudient globalement le cortège en déterminant tous les éléments compris entre 50 et 400 microns, ce qui provoque une surestimation de l'importance des petits minéraux. Pour pallier à cette cause d'erreur, les deux auteurs proposent d'exprimer le nombre des grains d'une espèce minérale donnée par rapport à 1 kg de sédiment brut.

En 1944, B. BRAJNIKOV reprend le problème et arrive après RUBEY (1933) aux conclusions suivantes:

— Les minéraux lourds sont plus abondants dans la fraction fine que dans la fraction grossière. Autrement dit, la courbe pondérale des minéraux lourds est décalée vers les fins par rapport au mode de la silice. Remarquons en passant que cette observation ajoute encore du poids à l'objection formulée en 1943. Dans un comptage global, non seulement les petits minéraux lourds sont surestimés, mais il se trouve également qu'ils sont les plus nombreux. On arrive donc à des résultats qui négligent pratiquement toute la fraction grossière du sédiment.

— BRAJNIKOV remarque également qu'au sein d'un échantillon, le cortège minéralogique varie avec l'intervalle granulométrique considéré. Il en arrive à penser que le mode d'une espèce cristalline est d'autant plus décalé vers les fins qu'elle est plus dense (application de la loi de l'équivalence).

Le tableau ci-dessous, extrait de son étude, donne une idée du décalage. Nous ne reproduisons ici que les deux tailles de quartz qui correspondent aux modes granulométriques observés sur le plateau continental.

Minéral	Densité	Taille en microns
Quartz	2,65	250 - 100
Tourmaline	3	206 - 82,5
Epidote	3,4	171 - 68,7
Disthène	3,6	159 - 63,5
Grenat amandin	4,2	129 - 51,6
Zircon	4,7	112 - 44,8

Ainsi, un sable de 250 microns aura un cortège lourd dont le mode sera voisin de 160 microns.

L'auteur en déduit que ne sont comparables que les sédiments ayant sensiblement la même taille et recommande l'étude des minéraux compris entre 50 et 350 microns.

Un certain accord semble d'ailleurs s'établir à cette époque entre les différents auteurs. PETTIJOHN (1938) aux Etats-Unis ayant montré que les sables les plus fréquents, quel que soit le milieu considéré, étaient compris entre 125 et 500 microns; BATOURINE étudie les minéraux compris entre 50 et 250 microns et l'école allemande travaille entre 200 et 400 microns pour les sables moyens et éventuellement 50-100 ou 50-200 microns pour les sables fins.

En 1947, cependant, L. BERTHOIS propose une table de calcul permettant de transformer les pourcentages obtenus par comptage, *en volume* pour chaque espèce minérale. L'auteur parvient ainsi à donner une estimation quantitative d'un minéral dans le sédiment global.

V.1.3. — L'ÉPOQUE DE LA RECHERCHE APPLIQUÉE.

Entre 1947 et 1960, on peut dire que l'étude théorique des minéraux ne progresse plus. Par contre, leur utilisation se généralise.

En effet, le principe de l'immuabilité du cortège dans une province sédimentaire donnait l'espoir de corréler les niveaux azoïques. C'est pourquoi, la majorité des études publiées en France au cours de cette période sont le fait de sédimentologues travaillant pour la recherche appliquée.

A. VATAN établit les grandes lignes de la sédimentation dans le Bassin de Paris (1948) et dans le Bassin d'Aquitaine (1948) F. BOYER travaille sur la Garonne (1949) étudiant les minéraux lourds par comptage global sur la fraction 50-444 microns. Il applique cependant les corrections de la table BERTHOIS.

J. DEBYSER, A. VATAN et F. BOYER publient enfin en 1955 une étude sur les dépôts sableux de la côte atlantique de la Loire à Arcachon. Regrettons cependant que la plupart de ces études, trop résumées, ne donnent que peu d'indications sur la taille des minéraux examinés.

Dans le secteur universitaire, S. DUPLAIX étudie les minéraux des plages (1948-1950) en essayant d'adapter ses méthodes à la taille des sédiments, que ce soit sur la plage de Graves, à la pointe de la Coubre, ou en Manche dans l'aber de Roscoff. Finalement, elle décide de travailler systématiquement sur les 3 intervalles granulométriques suivants: 500-315 microns, 315-160 microns et 160-40 microns. Elle publie en 1956 une thèse sur la répartition des minéraux lourds dans le sable des Landes et sur la côte atlantique, de la Gironde au Gouf de Cap-Breton qui est l'illustration de ses principes.

V.1.4. — L'ÉPOQUE DES DÉCEPTIONS (à partir de 1950).

V.1.4.1. — Inefficacité apparente des études de minéraux lourds.

Les minéraux lourds, très utilisés après la dernière guerre mondiale, vont subir à partir de 1950-1955 une éclipse sérieuse qui persiste encore de nos jours. Essayons d'en analyser les raisons:

1) L'industrie pétrolière, travaillant à grande échelle, devait montrer que les minéraux lourds n'avaient pas toujours la valeur stratigraphique qu'on leur attribuait. En suivant patiemment un certain nombre d'horizons dans les grands bassins sédimentaires, les Américains devaient constater que le cortège minéralogique se modifiait dans l'espace. La notion de province sédimentaire était donc prise en défaut. La conséquence immédiate fut l'impossibilité d'établir des corrélations sur de longues distances. A. VATAN (1953) résume bien cet état de fait en disant que « les minéraux lourds semblent se comporter comme des fossiles de faciès ».

2) Les critiques formulées à la théorie d'EDEL-MAN par des hydrodynamiciens tels que RUBEY et THIEBAUT, les observations de BRAJNIKOV,

puis les réserves de L. BERTHOIS ont contribué à mettre en relief le fait que la distribution des minéraux lourds dans un sédiment est très complexe, nullement homogène, et que le comptage global pratiqué sur un large éventail granulométrique n'est pas satisfaisant.

C'est ainsi qu'en examinant successivement un petit nombre de classes, on peut suivre les variations du cortège au sein du sédiment. VAN ANDEL et POOLE (1960) remarquent dans les sables fins du golfe du Mexique une grande quantité de zircons dans la classe 62-80 microns. Ils hésitent sur les tailles à étudier, mais finalement, VAN ANDEL conserve l'intervalle 62-500 microns. Une telle étude est un bon exemple de la perplexité des chercheurs à l'heure actuelle.

3) Un certain nombre d'auteurs fait remarquer également que l'étude des minéraux lourds exige un travail de laboratoire important précédant des comptages souvent fastidieux. Ils estiment que les résultats obtenus ne récompensent pas des efforts entrepris (P. JAFFRY et R. HOURS, 1959). Ils signalent en outre que la fraction lourde, de par sa densité, ne rend pas exactement compte du déplacement des sables plus légers. Telle est l'opinion, outre P. JAFFRY et R. HOURS (1959), de S. DUPLAIX et W. D. NESTEROFF (1959) et de F. OTTMANN (1965).

V.1.4.2. — Nouvelles recherches hollandaises et conclusion.

En 1964, VAN ANDEL qui croit toujours à l'intérêt des minéraux lourds, profite des calculateurs électroniques existant aux U.S.A. pour leur soumettre des séries de cortèges. La machine arrive à retrouver le nombre de sources émettrices probables. L'application à la baie de Californie, J. IMBRIE et T. G. H. VAN ANDEL (1964) est intéressante. Cependant, les résultats dépendent toujours d'un comptage préalable des minéraux lourds; or, celui-ci est toujours effectué d'une manière globale.

— Finalement, et malgré les efforts de VAN ANDEL, l'opinion générale présente est que l'on a surestimé l'intérêt des minéraux lourds et que l'étude des phénomènes actuels de sédimentation peut être réalisée plus rapidement à l'aide de traceurs radioactifs ou de luminophores.

Une paléogéographie basée sur la fraction lourde paraît donc en ce moment très aventurée. Faut-il donc renoncer à ce moyen d'investigation pour interpréter les dépôts fossiles ? Telle est la question que l'on se pose sérieusement de nos jours.

V.2. — Discussion sur la méthode: analyse d'un échec partiel.

Quelles sont les relations liant la phase siliceuse et les minéraux lourds au sein du sédiment ?

L'histoire de l'étude des minéraux lourds, telle que nous venons de l'évoquer se solde donc par un espoir déçu. Les résultats n'ont pas été à la mesure du travail fourni et les efforts de nombreux chercheurs pendant des années méritaient un meilleur sort.

Disons-le nettement: *l'échec partiel des études de minéraux lourds est du à une méthodologie mal adaptée, celle-ci étant la conséquence d'une conception erronée de la granulométrie.*

V.2.1. — LES DEUX GRANDES TENDANCES DE LA MÉTHODOLOGIE CLASSIQUE

On remarquera en effet que l'étude des minéraux denses a toujours été abordée selon deux axes de pensée:

1) Nous avons montré dans le chapitre précédent comment à la suite de l'école hollandaise on avait considéré le sédiment comme une *entité*. En déterminant les minéraux lourds dans un large éventail granulométrique, EDELMAN et ses successeurs ont le grand mérite d'être logiques avec eux-mêmes en menant leur raisonnement jusqu'au bout. Ils prennent

CHART 13. — Garnet morphoscopic evolution on continental shelf

CARTE 13. — Evolution morphoscopique du grenat sur le plateau continental