

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE

SERVICES DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

ÉTUDES
DES
GÎTES MINÉRAUX
DE LA FRANCE

LES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES
DE FRANCE

(FRANCE MÉTROPOLITAINE ET D'OUTRE-MER)

PAR

LUCIEN CAYEUX,

MEMBRE DE L'INSTITUT ET DE L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE,
PROFESSEUR HONORAIRE AU COLLÈGE DE FRANCE ET À L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE,
COLLABORATEUR PRINCIPAL AU SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

TOME III



PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE

MDCCCCL

LES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

DE FRANCE

(FRANCE MÉTROPOLITAINE ET D'OUTRE-MER)

TOME III

Étude des gîtes minéraux de la France.

- H. FOURNEL. *Étude des gîtes houillers et métallifères du bocage vendéen*, 1836, 1 vol. texte, 206 p., 1 atlas, 12 pl., 2 cartes.
- N. GARELLA. *Étude du bassin houiller de Graissessac*, 1843, 1 vol. texte, 112 p., 1 atlas, 11 pl.
- M. MANÈS. *Mémoire sur les bassins houillers de Saône-et-Loire*, 1844, 1 vol. texte, 178 p., 1 atlas, 13 pl.
- M. BAUDIN. *Description historique, géologique et topographique du Bassin houiller de Brassac*, 1849, 1 vol. texte, 136 p., 1 atlas, 24 pl.
- M. DROUOT. *Notice sur les gîtes de houille et les terrains des environs de Forges et de la Chapelle-sous-Dun et sur les gîtes de manganèse et les terrains des environs de Romanèche*, 1857, 1 vol. texte, 368 p., 1 atlas, 7 pl.
- E. DORMOY. *Topographie souterraine du bassin houiller de Valenciennes*, 1867, 1 vol. texte, 296 p., 1 atlas, 23 pl.
- M. GRUNER. *Étude des bassins houillers de la Creuse*, 1868, 1 vol. texte, 204 p., 1 atlas, 6 pl.
- M.-J. DORLHAC et M. AMIOT. *Bassin houiller de Brioude, de Brassac et Langeac*, 1881, 1 vol. texte, 318 p., 1 atlas, 18 pl.
- M. GRUNER. *Bassin houiller de la Loire*, 1882, 1^{re} partie, 1 vol. texte, 236 p., 1 atlas, 28 pl.; 2^e partie, 1 vol. texte, 506 p., 1 atlas, 28 pl.
- E. TRAUTMANN. *Bassin houiller de Ronchamp*, 1885, 1 vol. texte, 122 p., 1 atlas, 9 pl.
- A. OLRV. *Bassin houiller de Valenciennes*, 1886, 1 vol. texte, 414 p., 1 atlas, 12 pl.
- R. ZEILLER. *Bassin houiller de Valenciennes, description de la flore fossile*, 1888, 1 vol. texte, 732 p., 1 carte, 1 atlas, 94 pl.
- F. DELAFOND. *Bassin houiller et permien d'Autun et d'Épinac*, fasc. I, *Stratigraphie*, 1889, 112 p., 3 pl., 1 carte; fasc. II, *Flore fossile*, 1^{re} partie, par R. ZEILLER, 1890, 304 p.; fasc. III, *Poissons fossiles*, par H.-E. SAUVAGE, 1890, 32 p., 5 pl.; fasc. VI, *Flore fossile*, 2^e partie, par B. RENAULT, 1896, 1 vol. texte, 578 p., 1 atlas, 89 pl.; fasc. V, *Poissons fossiles*, par H.-E. SAUVAGE, 1893, 1 atlas, 9 pl.
- G. MOURET. *Bassin houiller et permien de Brive*, fasc. I, *Stratigraphie*, 1891, 460 p., 2 pl., 1 carte; fasc. II, *Flore fossile*, par R. ZEILLER, 1892, 132 p., 15 pl.
- F. DELAFOND et C. DEPÉRET. *Les terrains tertiaires de la Bresse et leurs gîtes de lignites et de minerais de fer*, 1893, 1 vol. texte, 332 p., 1 carte, 1 atlas, 19 pl.
- A. SOUBEIRAN. *Bassin houiller du Pas-de-Calais*, 1^{re} partie, 1895, 344 p.; 2^e partie, 1898, 414 p.
- E. COSTE. *Bassin houiller de la Loire*, 1900, 1 vol. texte, 260 p., 1 carte, 1 atlas, 16 pl.
- F. DELAFOND. *Bassin houiller et permien de Blanzay et du Creusot*, fasc. I, *Stratigraphie*, 1902, 1 vol. texte, 126 p., 1 atlas, 13 pl.; fasc. II, *Flore fossile*, par R. ZEILLER, 1906, 1 vol. texte, 266 p., 1 atlas, 51 pl.
- R. ZEILLER. *Flore fossile des gîtes de charbon du Tonkin*, 1903, 1 vol. texte, 328 p., 6 pl., 1 atlas, 56 pl.
- A. OLRV. *Topographie souterraine du bassin houiller du Boulonnais*, 1904, 240 p., 3 pl.
- J. GOSSELET. *Les assises crétaciques et tertiaires dans les fosses et sondages du Nord de la France*, fasc. I, *Douai*, 1904, 1 vol. texte, 144 p., 1 atlas, 7 pl.; fasc. II, *Lille*, 1905, 1 vol. texte, 100 p., 1 atlas, 5 pl.; fasc. III, *Béthune*, 1911, 1 vol. texte, 184 p., 1 atlas, 5 pl.; fasc. IV, *Valenciennes*, 1913, 1 vol. texte, 224 p., 1 atlas, 7 pl.; fasc. V, *Étude topographique du soubassement paléozoïque*, par J. GOSSELET et G. DEBOIS, 1922, 1 vol. texte, 122 p., 1 atlas, 2 pl.
- L. CAYEUX. *Structure et origine des grès du tertiaire parisien*, 1906, 160 p., 10 pl.
- L. CAYEUX. *Les minerais de fer oolithique de France*, fasc. I, *Minerais de fer primaires*, 1909, 344 p., 19 pl.; fasc. II, *Minerais de fer secondaires*, 1922, 1052 p., 35 pl.
- E. BUREAU. *Bassin houiller de la Basse-Loire*, fasc. I, *Description géologique*, 1910, 444 p., fasc. II, *Flores fossiles*, 1914, 1 vol. texte, 418 p., 1 atlas, 86 pl.
- CH. BARROIS. *Étude des strates marines du terrain houiller du Nord*, 1912, 120 p., 3 pl.
- P. BERTRAND. *Bassin houiller de la Sarre et de la Lorraine*, 1^{re} partie, *Flore fossile*, fasc. I, 1930, *Neuroptéridées*, 58 p., 30 pl.; fasc. II, 1932, *Alethopréridées*, 54 p., 30 pl.; fasc. III, par P. CORSIN, 1932, *Mariopitéridées*, 64 p., 47 pl.
- E. SIVIARD et Ed. FRIEDEL. *Atlas du bassin houiller de la Sarre et de la Lorraine*, 1932, 36 pl.
- G. WATERLOT. *Bassin houiller de la Sarre et de la Lorraine*, 2^e partie, *Faune fossile*, 1934, 317 p., 24 pl.; 3^e partie, *Description géologique*, par P. PRUVOST, 1934, 174 p., 3 cartes.

Mémoires annexes à la statistique de l'Industrie minière.

- J. DESROUSSEAUX. *Bassins houillers et lignifères de la France*, 1938, 392 p., 2 cartes.
- L. CAYEUX. *Les phosphates de chaux sédimentaires de France*, tome I, 1939, 350 p., 15 pl.; tome II, 1941, 310 p., 33 pl.; tome III, 1950, 360 p., 21 pl.

MÉMOIRES PUBLIÉS PAR LE SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE.

EXPLICATION DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE. Tome I, par A. DUFRÉNOY et ÉLIE DE BEAUMONT, 1841, 825 p., 1 carte.
Tome II, par A. DUFRÉNOY et ÉLIE DE BEAUMONT, 1848, 813 p. Tome III (1^{re} partie), par A. DUFRÉNOY, 1873, 231 p.
Tome IX, atlas de fossiles, par E. BAYLE et R. ZEILLER, 1878, 176 p.

Mémoires pour servir à l'explication de la Carte géologique détaillée de la France.

- F. FOUQUÉ et A. MICHEL-LÉVY. *Minéralogie micrographique*, 1879, 1 vol., texte 509 p., 1 atlas, 55 pl.
A. DE LAPPARENT. *Le pays de Bray*, 1879, 182 p., 4 pl.
J. GOSSELET. *L'Ardenne*, 1888, 890 p., 4 pl., 1 carte.
A. DE GROSSOUVRE. *Recherches sur la craie supérieure*, fasc. I, *Stratigraphie*, 1901, 2 vol., 1.013 p.; fasc. II, *Paléontologie*, 1894, 1 vol. texte, 264 p., 1 atlas, 39 pl.
M. MENTHÉN. *La géologie de la Corse*, 1897, 224 p.
P. TERMIER. *Les montagnes entre Briançon et Vallouise*, 1903, 188 p., 12 pl., 1 carte.
L. CAREZ. *La géologie des Pyrénées françaises*, fasc. I, 1903, 744 p., 2 pl.; fasc. II, 1904, 286 p., 11 pl.; fasc. III, 1905, 688 p., 5 pl.; fasc. IX, 1906, 762 p., 8 pl.; fasc. V, 1908, 700 p., 9 pl.; fasc. VI, 1909, 520 p., 4 pl.
W. KILIAN et J. RÉVIL. *Études géologiques dans les Alpes occidentales*, tome I, 1904, 630 p., 11 pl.; tome II, 1^{er} fasc., 1908, 374 p., 11 pl.; tome II, 2^e fasc., 1912, 280 p., 10 pl.
J. BOUSSAC. *Études paléontologiques sur le Nummulitique alpin*, 1911, 1 vol., 440 p.; 1 atlas, 22 pl.
J. BOUSSAC. *Études stratigraphiques sur le Nummulitique alpin*, 1912, 662 p., 10 pl., 10 cartes.
R. DOUVILLÉ. *Études sur les Cosmocératidés*, 1915, 75 p., 26 pl.
W. KILIAN et P. REBOUL. *Contribution à l'étude des faunes paléocrétacées du Sud-Est de la France*, 1915, 296 p., 15 pl.
L. CAYEUX. *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires*, 1916, 1 vol., 524 p., 1 atlas, 56 pl.; 2^e édition, 1932.
J. DE LAPPARENT. *Étude lithologique des terrains crétacés de la région d'Hendaye*, 1918, 156 p., 10 pl.
H. DOUVILLÉ. *L'Eocène inférieur en Aquitaine et dans les Pyrénées*, 1919, 84 p., 7 pl.
P. PRUVOST. *Description de la faune continentale du terrain houiller du Nord et du Pas-de-Calais*, 1920, 584 p., 29 pl.
Y. DEHORNE. *Les Stromatoporoidés*, 1921, 170 p., 17 pl.
E. DE MARGERIE. *Le Jura*, 1^{re} partie, *Bibliographie sommaire*, 1922, 1 vol. texte, 654 p., 25 pl., 1 atlas, 5 cartes; 2 parties, *Commentaire de la carte structurale*, 1936, 924 p., 19 pl.
W. KILIAN, M. GIGNOUX, E. CHAPUT, G. SAYN, P. FALLOT et P. REBOUL. *Contribution à l'étude des Céphalopodes paléocrétacées du Sud-Est de la France*, 1922, 266 p., 3 pl.
M. LERICHE. *Monographie géologique des collines de la Flandre française*, 1922, 112 p., 2 pl.
E. HAUG. *Les nappes de charriage de la Basse-Provence*, fasc. I, *La région toulonnaise*, 1925, 304 p., 6 pl., 2 cartes; fasc. II, *Le massif d'Allauch*, 1930, 182 p., 4 pl., 2 cartes.
M. A. DJANÉLIDZÉ. *Les Spiticeras du Sud-Est de la France*, 1925, 256 p., 22 pl.
L. CAYEUX. *Études des roches sédimentaires, roches siliceuses*, 1930, 774 p., 30 pl.
E. RAGUIN. *Haute Tarentaise et Haute Maurienne*, 1930, 120 p., 5 pl., 1 carte.
J. DE LAPPARENT. *Les bauxites de la France méridionale*, 1930, 187 p., 9 pl.
A. DEMAY. *Les nappes cévenoles*, 1931, 298 p., 3 pl., 3 cartes.
G. CORROY. *Le Callovien de la bordure orientale du bassin de Paris*, 1932, 337 p., 29 pl.
J. GOGUEL. *Description tectonique de la bordure des Alpes de la Bléone au Var*, 1936, 360 p., 2 cartes.
D. SCHNEEGANS. *La géologie des nappes de l'Ubaye-Embrunais entre la Durance et l'Ubaye*, 1938, 339 p., 10 pl., 2 cartes.
M. ROQUES. *Les schistes cristallins de la partie Sud-Ouest du Massif central français*, 1941, 530 p., 3 pl., 1 carte.
A. DEMAY. *Microtectonique et tectonique profonde*, 1942, 260 p., 19 pl.
J. GOGUEL. *Carte tectonique de la France*, 1941, 16 p., 1 carte.
J. JUNG. *Géologie de l'Auvergne*, 1946, 372 p., 14 pl.
A. DEMAY. *Tectonique antéstéphanienne du Massif Central*, 1948, 259 p., 9 pl. dont 3 cartes.
R. BARBIER. *Géologie des zones ultradauphinoises et subbriançonnaise entre l'Arc et l'Isère*, 1948, 292 p., 7 pl., 1 carte.
L. et J. MORELLET. *Le Bartonien du Bassin de Paris*, 1948, 438 p., 1 pl.
P. BELLAIR. *Pétrographie et tectonique des massifs centraux dauphinois. I. Le Haut massif*, 1948, 348 p., 1 carte.
J. GOGUEL. *Introduction à l'étude mécanique des déformations de l'écorce terrestre*, 1^{re} édition, 1943; 2^e édition, 1948, 530 p., 1 pl.
LE CALVEZ. *Revision des foraminifères lutétiens du Bassin de Paris*, I. *Miliolidae*, 1947, 46 p., 4 pl.; II. *Rotaliida*, 1949, 54 p., 6 pl.; III. *Polymorphinida*, 1950, 64 p., 4 pl.
Les tourbières françaises. 1^{re} partie : *Mémoires*, 1949, 227 p.; 2^e partie : *Prospections*, 1949, 634 p.; Atlas, 1949, 47 pl.
P. BORDET. *Étude géologique et pétrographique de l'Estérel*, 1951, 216 p., 5 pl.

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DU COMMERCE

SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

ÉTUDES
DES
GÎTES MINÉRAUX
DE LA FRANCE

LES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES
DE FRANCE

(FRANCE MÉTROPOLITAINE ET D'OUTRE-MER)

PAR

LUCIEN CAYEUX,

MEMBRE DE L'INSTITUT ET DE L'ACADÉMIE D'AGRICULTURE,
PROFESSEUR HONORAIRE AU COLLÈGE DE FRANCE ET À L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE,
COLLABORATEUR PRINCIPAL AU SERVICE DE LA CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

TOME III



PARIS
IMPRIMERIE NATIONALE

MDCCCCL

AVERTISSEMENT AU LECTEUR

Lorsque la mort est venue interrompre le travail de Lucien Cayeux, le troisième et dernier tome de son grand travail sur les Phosphates n'avait pas encore pu être publié, mais l'auteur en avait complètement établi le texte.

Le Service de la Carte géologique, qui avait assuré la publication des deux premiers tomes, se devait d'achever la tâche commencée en publiant le troisième et dernier tome. Cette publication a été rendue possible par une subvention financière du Comptoir des Phosphates de l'Afrique du Nord. Celui-ci avait déjà facilité beaucoup la préparation de l'ouvrage, en contribuant à l'installation, à l'École des Mines, du laboratoire où L. Cayeux a poursuivi ses travaux, après sa retraite du Collège de France.

Madame Rech-Frollo, docteur ès sciences, élève de Lucien Cayeux, a bien voulu se charger de mettre au point pour l'impression le manuscrit de l'auteur et d'établir les explications des planches. Les photographies avaient été préparées par Lucien Cayeux qui avait en particulier indiqué tous les renvois, mais les explications ont dû être reconstituées en s'aidant du texte.

Le Service de la Carte géologique tient à adresser ici ses très vifs remerciements à Madame Rech-Frollo et au Comptoir des Phosphates de l'Afrique du Nord.

CHAPITRE IV.

**PHOSPHATES EN GRAINS, CRÉTACÉS ET TERTIAIRES,
DU NORD DE L'AFRIQUE.**

(Suite et fin).

4° LES PHOSPHATES DU MAROC.

GÉNÉRALITÉS.

COUP D'ŒIL HISTORIQUE. — L'exposé des généralités, relatives à la découverte et à l'extention des phosphates du Maroc, m'est grandement facilité par l'excellente mise au point qu'a faite de la question le regretté A. Beaugé, Directeur général chérifien des phosphates⁽¹⁾.

Il est maintenant hors de conteste que la première mention de leur existence, au Maroc, date de 1908, et qu'elle est due à A. Brives. Sa découverte, au sud de Marrakech, a été signalée dans une Note présentée à l'Académie des Sciences au retour d'une mission remplie en 1906-1907⁽²⁾.

A. Brives avait présumé à son observation en signalant, le premier, en février 1905, la présence du Suessonien en plusieurs points du Maroc et, notamment, dans les régions de Chichaoua et l'Imintanout⁽³⁾. En décembre de la même année, P. Lemoine⁽⁴⁾, qui avait également exploré le sud-ouest du Maroc, appelait l'attention de la Société géologique de France sur « l'extrême importance de l'étude du Suessonien à cause de la recherche des phosphates ».

Rien, ou peu s'en faut⁽⁵⁾, n'a été fait pour explorer le Suessonien phosphaté avant l'entrée en scène du Général Liautey, en 1917, et d'un ingénieur de marque, le Commandant Bursaux, lequel avait acquis en Tunisie, au service de la Compagnie de Gafsa, une connaissance approfondie de la question des phosphates, dits suessonien. A. Beaugé⁽⁶⁾ a rappelé dans quelle circonstance le commandant Bursaux, chargé par le Résident général de la Direction des Chemins de fer militaires du Maroc, fut mis en présence, aux portes d'Oued Zem, d'une exploitation de phosphate meuble, confondu avec un sable ordinaire⁽⁷⁾. Bursaux y reconnut un sable phosphaté

⁽¹⁾ A. BEAUGÉ. — Histoire, Géologie, Organisation générale de l'exploitation, in Les Ressources minérales de la France d'outre-mer (*Publications du Bureau d'Études géologiques et minières coloniales*. IV. Le Phosphate, 1935, Maroc, p. 15-48, 2 pl.).

⁽²⁾ A. BRIVES. — Sur le Sénonien et l'Éocène de la bordure nord de l'Atlas marocain (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXLVI, 1908, p. 873).

⁽³⁾ A. BRIVES. — Sur les terrains éocènes dans le Maroc occidental (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXL, 1905, p. 395-397).

⁽⁴⁾ P. LEMOINE. — Mission dans le Maroc occidental (*Comité du Maroc*, 1905, 224 p., 63 fig. texte, p. 156-157).

Ibid. — Quelques observations sur la géologie du Maroc occidental (*B. S. G. Fr.*, 4^e série, t. V, 1905, p. 755-758).

⁽⁵⁾ A. BEAUGÉ a rappelé brièvement les quelques progrès réalisés dans l'intervalle par la prospection des phosphates au Maroc.

⁽⁶⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 19 et 20.

⁽⁷⁾ Pareille confusion avait été faite dans le Nord de la France, avant la découverte des phosphates de la Somme. On exploitait depuis longtemps à Beauval, près de Doullens, une sablière dont le produit, fort peu apprécié, servait à la construction, lorsque le sable, résultant de la décalcification de craies phosphatées, fut identifié, et sa haute teneur en acide phosphorique reconnue (I, p. 203).

exceptionnellement riche, dont les caractères physiques avaient induit en erreur géologues et prospecteurs. Il fit plus, en signalant au Général Liautey « l'importance extrême du gisement et sa grande extension vers le sud »⁽¹⁾.

Dès 1917, l'essentiel est acquis. C'est alors que la prospection de la formation phosphatée devient une entreprise d'État. Avec le concours de A. Brives, M. Solignac et J. Savornin, chargés de mission, le Service des Mines, sous la direction de M. Despujols, procède aux premières reconnaissances en de multiples régions : bassin découvert par Bursaux, qui sera finalement désigné sous le nom d'Ouled Abdoun, gisement, dit des Ganntour à l'est de Safi, régions de Chichaoua, d'Imintanout et des Meskala.

En 1921, la mission du Service des Mines consacrée aux recherches, prend fin. L'année précédente, le Général Liautey avait eu l'heureuse inspiration de créer l'*Office chérifien des Phosphates* et de mettre à la charge de l'État, la recherche et l'exploitation des phosphates. Durant quelques années, l'Office poursuit une double tâche. De 1921 à 1925, il définit avec précision tous les gisements reconnus, en même temps qu'il inaugure la mise en valeur des phosphates dans le vaste domaine des Ouled Abdoun (Kourigha). Dès 1921, les phosphates du Maroc font leur apparition sur le marché. Sous l'impulsion de A. Beaugé⁽²⁾, nommé Directeur général de l'Office, l'entreprise revêt rapidement une grande ampleur et devient pour le Maroc une source de revenus considérables.

Maintenant que le temps a mis chacun à sa place, il est rigoureusement conforme à la vérité de dire qu'A. Brives a signalé, le premier, l'existence de phosphates au Maroc, que le Commandant Bursaux est, à proprement parler, l'inventeur des phosphates exploitables, et qu'à l'ingénieur, A. Beaugé, revient le très grand mérite d'avoir organisé une mise en valeur desdits phosphates, adéquate à l'importance des gisements, tenus pour les premiers du monde. Il serait injuste d'omettre, n'est-il pas vrai, que l'ombre bienfaisante du Maréchal Liautey plane sur l'œuvre de l'Office, qui compte parmi les plus belles réalisations du Maroc, et que, sous l'éminente direction de M. Lenhardt, l'entreprise est loin d'avoir trahi ses promesses.

Au cours des deux missions que j'ai consacrées aux phosphates du Maroc (1928 et 1936), j'ai bénéficié de toutes les facilités souhaitables. J'en garde une profonde reconnaissance à l'Office chérifien, et tout particulièrement à son directeur M. Lenhardt.

DISTINCTION DES DIFFÉRENTS GISEMENTS. — Les recherches, dont il vient d'être question très brièvement, ont abouti à la découverte et à la distinction de cinq régions phosphatées d'importance fort inégale, que A. Beaugé désigne de préférence sous le nom de gisements. Dans l'exposé qui va suivre, ces gisements seront groupés en trois bassins, et j'en ajouterai un quatrième, en m'inspirant des découvertes de L. Moret dans l'Atlas de Marrakech :

1° *Bassin septentrional*, compris entre le parallèle de Settat et le fleuve Oum er Rbia, réunissant le grand gisement des Ouled Abdoun, où se trouve le centre d'exploitation de Kourigha, et son prolongement le gisement du Tadla;

⁽¹⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 19.

⁽²⁾ Ancien Directeur des Exploitations de Gafsa.

2° *Bassin intermédiaire*, correspondant au gisement des Ganntour, compris entre les massifs anciens des Rehamna, au nord et des Djebilet au sud. C'est là qu'on a créé récemment un second centre d'exploitation, connu sous le nom de Louis-Gentil;

3° *Bassin méridional*, réunissant les gisements de Chichaoua, des Meskala, et d'Imintanout, situés en avant du Grand Atlas, et séparés des précédents par les Djebilet;

4° *Bassin de l'Atlas de Marrakech*, groupant les multiples points du Grand Atlas, où L. Moret a découvert des gisements de phosphate.

Quel que soit le résultat de notre étude, au sujet des rapports originels entre ces quatre groupes, il n'y a nul inconvénient à les désigner sous le nom de Bassins. L'usage a prévalu depuis longtemps d'appliquer ce terme aux fractions d'une grande unité répondant à une cuvette de sédimentation. Ne parle-t-on pas couramment de Bassins de Valenciennes, de Mons, de Charleroi, de Liège, etc., dont la totalité forme le grand Bassin houiller franco-belge?

AGE DES PHOSPHATES DU MAROC. — Les données paléontologiques réunies sur les phosphates marocains témoignent d'un grand désaccord, principalement dû, croyons-nous, à la multiplicité des horizons phosphatés et au rapprochement d'éléments qui sont loin d'être synchroniques.

A. Beaugé⁽¹⁾ a rappelé, en quelques pages très documentées, les contributions successives à l'étude de la question, ce que je ne puis faire ici. A. Brives, L. Russo, J. Savornin, L. Gentil, L. Joleaud, Ch. Depéret, L. Moret et E. Roch ont apporté leur pierre à l'édifice. En deux mots, on peut dire que ces phosphates ont été attribués tour à tour, au Maëstrichtien et au Danien (L. Gentil), au Montien (L. Joleaud), au Suessonien (J. Savornin), au Campanien-Montien (Ch. Depéret et L. Russo).

Fixant la somme de nos connaissances sous ce rapport, A. Beaugé fait commencer les phosphates exploitables avec un Sénonien, caractérisé par un Mosasaure (*Leiodon anceps*) [Ganntour]; puis viennent des phosphates également exploitables, d'âge maëstrichtien (Meskala), renfermant *Corax pristadontus*. A cet ensemble fait suite la grande masse des phosphates, correspondant aux « phosphates au-dessous des calcaires à Thersitées » d'Ed. Roch, qu'A. Beaugé situe à « 10 mètres au minimum et 40 mètres au maximum » au-dessous des calcaires à Thersitées⁽²⁾. Des documents paléontologiques qu'il a rassemblés, A. Beaugé conclut : « La seule chose que l'on puisse dire actuellement, c'est que les couches supérieures du faisceau phosphaté des Ouled Abdoun, du Tadla et des Ganntour... sont à peu près certainement éocènes⁽³⁾ ». Il en serait de même pour « la tête des gisements » de Chichaoua et du nord d'Imintanout.

D'après L. Moret et E. Roch, il existe des phosphates à un niveau plus élevé, c'est-à-dire au-dessus des calcaires à Thersitées. L. Moret⁽⁴⁾ les a signalés dans l'Atlas de Marrakech, et au

⁽¹⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 24-30.

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 27.

⁽³⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 29.

⁽⁴⁾ L. MORET. — Sur l'extension des couches à phosphate dans le Haut-Atlas de Marrakech (*C. R. Ac. Sc.*, t. CLXXXV, 1927, p. 784).

Ibid. — Sur l'extension des couches à Thersitées et à phosphate dans le versant sud de l'Atlas de Marrakech (*C. R. Ac. Sc.*, t. CLXXXVII, 1928, p. 1152).

Ibid. — Recherches géologiques dans l'Atlas de Marrakech (*Mém. Serv. Mines et Carte géol.*, 1931).

sud du massif, où il les a reconnus sur de grandes surfaces, et E. Roch ⁽¹⁾, dans le domaine d'Imintanout, au pied de l'Atlas.

A. Beaugé a estimé, non sans raison, que le problème de l'âge des couches supérieures du faisceau des Ouled Abdoun, du Tadla et des Ganntour était à reprendre. En fait, le port du Crétacé et de l'Éocène dans l'ensemble des couches restait à préciser. Une nouvelle étude des faunes était d'autant plus souhaitable que l'opinion de P. Russo, rangeant les phosphates des Ouled Abdoun dans le Crétacé, remettait en question l'âge de tous les phosphates marocains.

A la demande de Beaugé, C. Arambourg s'est livré sur place à une enquête approfondie avec le concours du personnel de l'Office. De l'analyse des nombreux restes de Vertébrés recueillis, il résulte suivant les termes mêmes de l'auteur, que dans la région des Ouled Abdoun «les niveaux phosphatés zéro, I et II, appartiennent par leur faune à l'Éocène; le niveau II représente la base du système thanétien-sparnacien; les niveaux I et zéro, ainsi que le complexe marno-calcaire plus ou moins phosphaté du toit jusqu'à la dalle à Thersités, l'Yprésien et l'Éocène moyen; ces deux derniers sont, par suite, l'équivalent des niveaux phosphatés de l'Algéro-Tunisie, dont les caractères fauniques, mis en évidence par Priem et par Leriche, sont identiques. La présence du Montien, que caractérise généralement un mélange de formes crétacées et éocènes, n'est pas indiquée paléontologiquement dans cette partie du Maroc ⁽²⁾ ». Quant à la couche III, elle rentre par sa faune dans le Crétacé supérieur, sans qu'il soit possible de la rapporter au Maëstrichtien plutôt qu'au Danien.

La même étude, étendue au groupe des Ganntour conduit à la conclusion que la couche exploitée à L. Gentil n'est pas synchronique de la couche I des Ouled Abdoun. D'après C. Arambourg, sa faune de Vertébrés, constituée par un mélange d'espèces crétacées et éocènes, caractérise le Montien, ce qui revient à dire que chronologiquement, sa place se trouve entre II et III des Ouled Abdoun. De ce chef, il y aurait une différence d'âge très prononcée entre les faisceaux exploitables de part et d'autre.

Observons que les conclusions d'Arambourg, fondées sur l'étude des Vertébrés, sont quelque peu en désaccord, pour le Bassin des Ganntour, avec celles de P. Marie, résultant de l'analyse des Foraminifères de la même région, dont la faune serait d'âge crétacé pour la totalité des horizons phosphatés ⁽³⁾. On aimerait connaître la raison de cette divergence, et savoir lesquels des petits Foraminifères et des restes de Vertébrés nous donnent la note exacte. De toutes façons, les couches I sont loin d'être synchroniques dans les deux gisements.

Malgré l'échelonnement des gisements dans le temps, et la part variable qui revient au Crétacé et au Tertiaire dans leur constitution, il ne saurait être question de dissocier les horizons d'âge différent, pour donner le pas à l'argument chronologique. Ici, comme dans l'étude des phosphates tunisiens, et algériens, la reconstitution du milieu générateur des phosphates, considérés en bloc, s'inscrit en tête de mon programme de recherches.

⁽¹⁾ E. ROCH. — Études géologiques dans la région du Maroc occidental (*Serv. des Mines et de la Carte géol. du Prot. de la Rép. fr. au Maroc. Notes et Mém.*, 1930, p. 467).

⁽²⁾ C. ARAMBOURG. — Note préliminaire sur les Vertébrés fossiles des phosphates du Maroc (*B. S. G. Fr.*, 5^e série, t. V, 1935, p. 413-439, pl. XIX-XX).

⁽³⁾ P. MARIE. — Sur les microfaunes du Crétacé des Ganntour (Maroc occidental) [*C. R. Som. S. G. Fr.*, 1935, n° 7, p. 105-107].

Dans la description qui va suivre j'étudierai successivement les quatre bassins distingués dans l'ordre où ils ont été énumérés.

I. — BASSIN DES OULED ABDOUN.⁽¹⁾

Situé sur le parallèle de Settat, au sud-est de Casablanca, et à environ 120 kilomètres à vol d'oiseau de cette ville, le Bassin des Ouled Abdoun, non compris son prolongement du Tadla, à l'Est, s'étend en gros sur une longueur de 80 kilomètres, dans la direction de l'ouest à l'est, et sur quelque 60 kilomètres du nord au sud.

La succession des dépôts qui en constituent le faisceau phosphaté a été fixée par des centaines de recherches du Service des Mines. Les coupes, mises à ma disposition par l'Office, font ressortir les variantes de la formation phosphatée, mais elles laissent dans l'ombre les caractères stratigraphiques et pétrographiques du complexe, et, point capital, les perturbations enregistrées par le milieu qui a engendré les phosphates. C'est pourquoi j'ai relevé moi-même quelques coupes détaillées, accessibles à la surface, ou visibles dans les travaux d'exploitation. Entre autres avantages, elles ont celui de situer exactement les échantillons analysés dans les séries étudiées.

CONCLUSIONS A TIRER DES TRAVAUX DE PROSPECTION. — Avant de faire état de mes observations personnelles, il est utile d'analyser les coupes susceptibles de fournir une vue d'ensemble du complexe phosphaté. Celle-ci met en évidence l'existence de quatre couches principales, numérotées, suivant l'ordre ascendant, IV, III, II, I et d'une couche supérieure, zéro, le tout ne représentant, en réalité, qu'une partie du faisceau phosphaté. De l'étude de celui-ci on peut tirer les enseignements suivants :

1° Sa constitution fait ressortir l'existence d'un grand nombre d'horizons phosphatés.

Voici un premier exemple fourni par la recherche du Kef-Gatta, sur le plateau de Kourigha, qui a repéré 9 couches principales, mesurant respectivement :

Couche I.....	2 m. 35
— II.....	1 m. 95
— III.....	2 m.
— IV.....	1 m. 75
— V.....	0 m. 60
— VI.....	1 m. 05
— VII.....	0 m. 60
— VIII.....	1 m. 35
— IX.....	1 m.

représentant 12 m. 65 de phosphate — non compris les horizons d'épaisseur réduite et les phosphates très impurs (phosphates marneux, marnes phosphatées, etc.).

⁽¹⁾ Je ne saurais trop témoigner ma reconnaissance à MM. de Sainte-Marie et Lamielle, respectivement Directeurs des exploitations de Kourigha en 1928 et 1936, et à leurs ingénieurs de tous grades que j'ai mis largement à contribution au cours de mes deux séjours.

Un second exemple, correspondant à la descenderie de Seb Bir Haouz, du même plateau de Kourigha, a traversé 16 horizons de phosphate, dont les 3 principaux titrent respectivement 74,29 65,49 et 71,08 p. 100 de phosphate de chaux.

En réalité, le nombre des horizons très phosphatés est plus élevé que ne l'indiquent les coupes datant de la période de prospection, car les calcaires dits phosphatés qui servent de murs aux couches numérotées, sont eux-mêmes très riches en grains de phosphate, ce que montrent les exemples suivants, fournis par le mur de la couche I.

Descenderie Ksibet-el-Draben.....	45,38	p. 100	de phosphate de chaux.
— D.....	49,71	—	—
— Biar Ouled Tazi.....	51,39	—	—
— Kerkour Ahmed Tounsi.....	52,36	—	—

Ce sont là des teneurs qui, en d'autres temps, auraient été jugées susceptibles de justifier amplement une tentative de mise en valeur.

En conséquence, nous observons ici, comme en Tunisie et dans l'Est algérien, une très grande dispersion de la matière phosphatée, dans la formation même, et des périodes de concentration maxima, correspondant aux couches repérées.

2° L'analyse des coupes nous enseigne également qu'elles ne sont nullement comparables terme à terme, preuve que *le régime était variable d'un point à l'autre*. Cette variabilité s'affirme, non seulement pour les horizons phosphatés, mais pour les intercalations stériles, dont la nature et la puissance sont non moins sujettes à variations.

3° Cette mise en parallèle souligne encore d'importantes différences dans les caractères pétrographiques des terrains situés au mur des phosphates. A ce sujet, la coupe de la formation phosphatée au Kef Gatta nous apprend que presque tous les murs sont marneux, alors que celle du Seb Bir Haouz accuse une très grande prédominance des murs calcaires. D'un côté, la couche I repose sur des marnes et de l'autre sur des calcaires.

4° Les travaux de prospection ont démontré que la teneur exceptionnellement élevée des phosphates, exploités dans la région de Kourigha, ne se maintient pas dans toute l'étendue du Bassin.

Selon A. Beaugé, le prolongement du Tadla, à l'Est, que je n'ai pas visité, « ne présente pas grand intérêt au point de vue exploitation ». Il y aurait là des phénomènes de décalcification, engendrant des sables phosphatés, localisés dans des poches, et titrant, par exception, jusqu'à 73,50 p. 100. Quant aux couches mêmes elles seraient caractérisées par une « teneur non marchande »⁽¹⁾.

Il n'en va pas de même, tout au Sud du Bassin, dans la région d'El Boroudj. D'importantes recherches consistant en longues tranchées, à flanc de coteau, complétées par des galeries, descenderies à forte pente et puits, ont exploré la formation en détail. De leur étude, A. Beaugé conclut que la couche I reste la plus riche du faisceau, comme à Kourigha, avec une teneur toujours supérieure à 70 p. 100, mais n'atteignant 73 p. 100 que par exception⁽²⁾. On y a repéré

⁽¹⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 35.

⁽²⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 34.

jusqu'à six couches différentes, en ne tenant compte que des plus riches. A titre d'exemple, je reproduis la succession observée dans les tranchée et pente de Kef Abbou, situés à 4 kilomètres à l'Ouest d'El Boroudj publiée par A. Beaugé⁽¹⁾.

Calcaire siliceux à grosses Thersités.....	20-25 m.
Alternance de marnes dures, calcaires marneux, marnes siliceuses et ferrugineuses, filets de phosphate de quelques centimètres.....	15 m. 30
<i>Couche I</i> (72-75 p. 100).....	1 m. 50
Marnes.....	4 m. 20
<i>Couche II</i> (65 p. 100).....	1 m.
Calcaires phosphatés, marnes, phosphates marneux à faible teneur (dont un niveau de 1 m. 80 à 46,90 p. 100).....	8 m. 90
<i>Couche III</i> (66,20 p. 100).....	1 m. 60
Marnes jaunes.....	1 m.
<i>Couche IV</i> (48 p. 100).....	1 m. 80
Marnes jaunes.....	4 m. 40
<i>Couche V</i> (49,70 p. 100).....	1 m. 20
Alternance de marnes et silex en bancs, avec filets phosphatés.....	6 m. 60
<i>Couche VI</i> (49,15 p. 100).....	0 m. 95
Marnes jaunes et eau.	

De la comparaison de cette coupe avec celles de la région de Kourigha, au Nord, il résulte, d'après Beaugé, que la puissance totale de la formation phosphatée est sensiblement plus forte au Sud, du côté d'El Boroudj (48 m. au lieu de 20 à 25 m.).

COUPES DÉTAILLÉES DE LA FORMATION PHOSPHATÉE.

Je n'aurai en vue dans les pages qui vont suivre qu'une partie seulement du complexe phosphaté, correspondant, sauf exceptions, à l'ensemble des horizons compris entre la couche IV, à la base, et la couche zéro à la partie supérieure. Il s'agit, en conséquence, d'une série commençant avec le Crétacé supérieur (IV et III) et s'élevant jusqu'à l'Eocène moyen inclus (II, I et 0) [p. 669].

En l'état présent des choses, les terrains phosphatés peuvent être étudiés dans des carrières, dans des travaux de recherches qui sont encore accessibles, le long des voies ferrées desservant les sièges en exploitation (Bou-Jniba et Bou-Lanouar) et dans les galeries de mines. Le tout n'est pas nouveau quand on passe d'une région à l'autre, du moins il est des faits qu'on ne peut observer que dans l'une d'elles, et qu'il importe de ne pas laisser dans l'ombre, lorsqu'on se propose de dégager une image fidèle du gisement.

J'étudierai d'abord les coupes qu'on peut observer à l'air libre, puis celles des travaux de mines.

(1) A. BEAUGÉ. *Op. cit.*,

CARRIÈRES D'OUED-ZEM.

Situées à l'extrémité orientale du Bassin, les carrières d'Oued-Zem fournissent immédiatement à l'observateur une bonne vue d'ensemble du complexe phosphaté, et c'est logiquement par elles qu'il faut aborder l'étude du gisement. Ces carrières, qui s'alignent à flanc de côté, à proximité du cimetière, fournissent un sable phosphaté employé à divers usages, au lieu et place du sable siliceux, absent dans la région. C'est en identifiant correctement ce sable que Bursaux a donné le branle aux recherches qui ont abouti à la découverte des multiples bassins phosphatés du Maroc. Des observations relevées en différents points, et non sur une même verticale, m'ont servi à établir la coupe schématique ci-contre.

Les nombreux horizons qu'elle comporte vont être passés en revue, en suivant l'ordre ascendant :

A. — Calcaire un peu phosphaté, seulement visible sur quelque 12 centimètres, au moment où la coupe a été levée.

B. — Calcaire phosphaté, formant sable, raviné et supprimé par places.

C. — *Couche V*, représentée par un phosphate très impur (2 m. 50 à 3 m.). On pourrait, à la rigueur, la dédoubler, attendu qu'elle renferme, par places, un véritable « banc limite », d'existence très sporadique.

D. — Calcaire, marnes, argiles barriolées (1 m.).

Des blocs éboulés du calcaire sont criblés à la surface de perforations, généralement petites; c'est-à-dire que ce calcaire a joué également le rôle de « banc limite ».

E. — *Couche IV*, composée de phosphate teinté en jaune roux (1 m. 30).

F. — Banc de calcaire dur, phosphaté, d'aspect cristallin, dessinant une table à surface bosselée, formant corniche et assimilable à un « banc limite ».

G. — *Couche III*, constituée par un phosphate très concrétionné, du moins à la surface (1 m. 25).

H. — Banc de calcaire dur, à cassure miroitante, pourvu d'un ciment de calcite très largement cristallisé. Ce banc, que l'érosion a mis en saillie, présente une surface irrégulière, recouverte d'organismes incrustants. Il s'agit encore d'un « banc limite ».

I. — *Couche II* (environ 3 m.).

J. — Petit ruisseau de boudins phosphatés, d'existence sporadique, dont l'épaisseur ne dépasse pas quelques centimètres.

K. — Banc de calcaire phosphaté, à surface bosselée, susceptible de renfermer de nombreux galets, et des ossements fragmentaires.

L. — *Couche I* (1 m. 60-2 m. 50), sous la forme d'un beau sable phosphaté, de teinte grise, renfermant, outre une table de silex discontinue, située à sa partie supérieure, et susceptible d'être relayée par deux cordons, quelques silex en boules, disséminés dans le phosphate à toute hauteur. De plus, il existe à la partie inférieure, sur environ 0 m. 10 à 0 m. 15, un petit cordon de galets calcaires, gris, irréguliers, mesurant au plus 9 centimètres de plus grand diamètre, parfois perforés, généralement posés à plat, auxquels s'ajoutent de nombreux débris d'ossements. Ce lit de galets repose directement ou non sur le mur, dont il nivelle les irrégularités. En même temps que le sable phosphaté de base se charge de galets, il devient lui-même grossier.

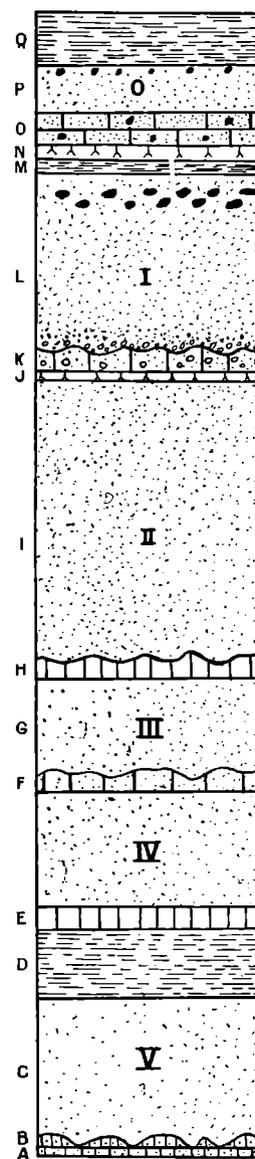


Fig. 62.

M. — Marnes grises et roses (0 m. 20).

N. — Nombreux boudins phosphatés, groupés sur une épaisseur de 0 m. 05 à 0 m. 15.

O. — Calcaire phosphaté renfermant quelques silex (0 m. 70).

P. — *Couche O* (0 m. 90) constituée par un sable phosphaté, renfermant quelques silex à sa partie supérieure.

Q. — Argile (0 m. 70).

Cette coupe met en évidence un fait à souligner tout particulièrement, au début de notre étude des phosphates marocains. Sous des formes différentes, un même phénomène prélude à la sédimentation phosphatée. Ce phénomène n'est autre qu'une perturbation qui ravine le mur de chaque couche, et qui se manifeste par des perforations, voire par le dépôt de matériaux grossiers.

A peine avons-nous amorcé notre enquête que la loi des ruptures d'équilibres, qui préside à la genèse des phosphates de Tunisie, d'Algérie et d'autres encore, se dégage sans ambiguïté.

Notons encore que, malgré l'affleurement de la formation phosphatée sur des centaines de mètres, il est impossible d'observer la moindre trace des phosphates argilo-ferrugineux, développés à grande échelle en profondeur, aux dépens des couches I et II, dans les sièges de Bou-Jniba et Bou-Lanouar.

TRANCHÉES DE LA VOIE FERRÉE, DITE VOIE NORMALE.

La voie ferrée, qui relie Kourigha au siège de Bou-Jinba, permet d'étudier le complexe phosphaté avec ses quatre couches principales et son toit.

En 1928, on pouvait observer, dans la tranchée de Lalla Fathma et en contre-bas, les couches inférieures à partir du n° IV et de son mur. Des modifications apportées en un point la dérobent maintenant à nos investigations⁽¹⁾. La succession ascendante relevée en 1928 était la suivante :

A. La *couche IV*, épaisse d'environ 3 m. 50, avait pour mur un calcaire très perforé par des Mollusques lithophages, surmonté d'une belle concentration de boudins phosphatés, ne mesurant pas moins de 0 m. 40. Quant à la couche même, elle se signalait par un aspect concrétionné, résultant de la juxtaposition de petites boules de la taille d'une bille ou d'une noix, quelquefois libres en grand nombre, et le plus souvent agglutinées, auquel cas le produit rappelait tout à fait les caractères du grès concrétionné de Fontainebleau. Il était alors possible de s'assurer que les bancs à structure globulaire à la surface étaient indifférenciés en profondeur, comme si le facies spécial du dépôt avait une origine superficielle, conclusion corroborée par toute une série d'observations en d'autres points. En l'absence de la structure globulaire, le phosphate de la couche IV se résout en une roche grise montrant sur sa cassure de nombreux grains de phosphate gris blanc, isolés au sein d'une gangue calcaire très développée. A sa base, l'horizon ne diffère du reste que par une moindre fréquence des matériaux phosphatés.

⁽¹⁾ Le numérotage des couches m'a été indiqué par le regretté Nougaret, maître-mineur, chargé de recherches, qui par sa connaissance de la formation phosphatée a beaucoup facilité ma tâche en 1928.

B. La *couche III* (1 m. 30), de nature rocheuse, avait pour mur un calcaire phosphaté, dur, bosselé, raviné, parfois perforé par des boudins phosphatés, jouant le rôle de toit par rapport à la couche précédente. Il était visible sur le bord de la voie ferrée, où il se montrait largement dégagé et à plat.

C. La *couche II*, épaisse de 1 m. 20 à 1 m. 30, était séparée de la précédente par un banc de calcaire phosphaté pauvre, très consistant, raviné et incrusté.

Le long des tranchées qui font suite à la précédente, dans la direction de Bou-Jniba, la formation est accessible au complet.

De l'étude que j'en ai faite, en 1936, je vais noter les principaux éléments, sans tenir compte de l'ordre dans lequel les observations ont été relevées, et en suivant la succession ascendante des dépôts.

La *couche III* témoigne à sa base d'une sérieuse perturbation. On la voit, soit raviner en plusieurs points les marnes qui la séparent de la couche IV, soit caractérisée par une stratification de courant très nette, soit, enfin, chargée de matériaux grossiers qui, par places, la transforment en conglomérat. Elle renferme alors de nombreux petits débris de Vertébrés, des galets imparfaits, de nature calcaire, ou marneuse, mesurant parfois plus de 1 décimètre et posés à plat. Ces matériaux, jamais contigus, sont dispersés sur 0 m. 10 ou 0 m. 15, dans un ciment de phosphate grossier très prépondérant. En un point, j'ai observé, à cette même base, un peu de lumachelle résultant d'une préparation mécanique, ainsi que de nombreuses dents de *Corax*, confirmant l'âge crétacé, attribué à l'horizon par Arambourg. On y peut constater, en outre, l'existence d'une petite intercalation de calcaire phosphaté (0 m. 15-0 m. 20), d'allure sporadique, pétri de boudins phosphatés. Quant au phosphate lui-même, il est souillé par l'inclusion de petits feuillets argileux.

La séparation des couches III et II se fait par des marnes barriolées, épaisses de 0 m. 50, que surmonte une concentration, sur 0 m. 15, de boudins phosphatés, engagés dans la base même de la *couche II*, représentée par un calcaire phosphaté. Le phosphate de cette couche renferme des coprolithes en petits nombres, et quelques boucles de quartz géodique, caractéristiques de l'horizon.

Quant à la *couche I*, on peut l'étudier dans d'excellentes conditions, ainsi que les dépôts qui l'encadrent. De l'ensemble, voici la coupe détaillée, en suivant l'ordre ascendant (fig. 63):

- A. — Sable phosphaté et silex isolés.
- B. — Marnes (0 m. 15).
- C. — Boudins phosphatés, plongeant dans les marnes et se reliant à l'horizon suivant (quelques centimètres).
- D. — *Couche I* (1 m. 30), sable phosphaté brunâtre, relativement fin, renfermant quelques amas de calcaire phosphaté, disséminés en pleine couche. Dans l'ensemble, l'horizon revêt un aspect grossier, dont il est redevable à la présence de nombreux coprolithes.
- E. — Phosphate avec feuillets marneux (0 m. 15).
- F. — Nombreux silex phosphatés, inclus dans un phosphate sableux (0 m. 20).
- G. — Sable phosphaté (0 m. 25). (Couche zéro?)
- H. — «Marnes» barriolées (0 m. 15).
- I. — Concentration de boudins phosphatés (0 m. 05-0 m. 10).

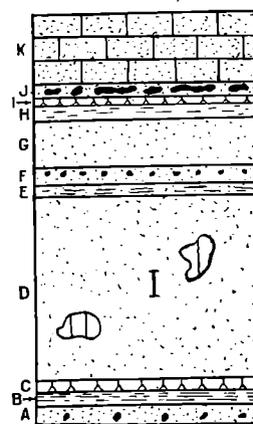


Fig. 63.

I B.

J. — Silex phosphatés de grande taille, de forme irrégulière et presque contigus, englobés dans du phosphates (0 m. 15).

K. — Calcaire phosphaté (0 m. 50).

J'ai observé cette même couche I, en 1928, dans une tranchée où débouchait une galerie. Puissante de 1 m. 60, elle était interrompue à 0 m. 35 du mur par un petit lit d'argile barriolée, légèrement phosphatée, mesurant 0 m. 10 et formant une barre d'une rectilignité parfaite. La couche se terminait au toit par une table continue de silex. Quant à son mur, il était constitué par un calcaire phosphaté d'épaisseur variable, atteignant 0 m. 70 au point où l'observation a été relevée⁽¹⁾.

Au-dessus de la couche I, et de la couche O dont il sera question bientôt, se place un complexe essentiellement marno-calcaire, renfermant, entre autres horizons, des marnes à silex quartzifiés et silex géodiques, d'aspect concrétionné. Il existe donc, au toit de la formation phosphatée de la région de Kourigha, des accidents siliceux de type très aberrant, en tous points pareils à ceux que j'ai signalés, au toit des phosphates tunisiens (II, p. 438). Tout se passe, en conséquence, comme si la sédimentation phosphatée avait été suivie, de part et d'autre, d'un épisode à caractère exceptionnel, intervenant au cours d'une même période, en des régions fort éloignées, pour engendrer des rognons siliceux, tels qu'on n'en voit nulle part ailleurs. Je ne vois d'explication possible d'une telle analogie qu'en faisant appel à des milieux marins réalisant des conditions très analogues.

CONCLUSIONS.

Des données que je viens de rassembler et d'observations non consignées dans les pages précédentes, on peut retenir que dans le domaine envisagé :

- 1° Les perturbations qui se manifestent au début de chaque couche revêtent de multiples manières d'être : *ravinements, perforations, changements de caractères lithologiques, intercalation de galets*, etc.
- 2° Les boudins phosphatés, faisant figure de perforations, peuvent exister à la base des horizons phosphatés les plus importants;
- 3° Des quatre couches considérées, seule la plus élevée, n° 1, renferme des silex;
- 4° La différenciation globulaire signalée dans la couche IV (p. 670) s'observe également à d'autres niveaux et, dans tous les cas, elle a pris naissance secondairement;
- 5° Les calcaires phosphatés visibles dans les tranchées sont susceptibles de renfermer, avec une certaine fréquence, des inclusions de sable phosphaté, *isolées de toutes parts*.
- 6° Pas un seul affleurement de couches phosphatées ne montre d'imprégnation argilo-ferrugineuse qu'on puisse rapporter à des actions météoriques, actuelles, récentes ou anciennes.
- 7° Il existe au toit de la couche I des horizons de marne ou d'argile barriolée, parfaitement individualisés et stratifiés, d'origine indubitablement sédimentaire.

⁽¹⁾ Ce point est mal repéré dans mes notes.

Quant à l'allure d'ensemble des terrains suivis sur des kilomètres, le long des voies ferrées, elle trahit de légères ondulations, en plus de la très faible pente qui permet d'observer successivement les divers éléments de la formation.

GALERIES DES MINES.

L'exploitation étant limitée à la couche I, il est de toute impossibilité d'étudier l'ensemble de la formation dans les galeries. Au total, le champ des observations s'étend entre, et y compris, la couche II et la couche O. Quoique plus restreint qu'à la surface, il pose des problèmes d'importance primordiale pour l'histoire des phosphates du Maroc.

Siège de Bou-Lanouar. — Il offre l'avantage de montrer au complet la succession des couches II, I, O. La couche II est visible dans la galerie, dite du personnel, et les couches I, O, dans les galeries et chantiers d'exploitation. La coupe établie, d'après des observations non relevées sur une même verticale, est la suivante de bas en haut :

A. — Calcaire phosphaté, dur, dont la partie supérieure, seule visible, est ravinée.

B. — *Couche II*, entièrement sableuse, ou calcaréo-phosphatée suivant les points et, en moyenne, beaucoup plus chargée de calcaire phosphaté que la couche I. Quand le phosphate est sableux, il renferme ou non des concentrations de calcaire phosphaté, gisant isolément dans le sable.

C. — Calcaire phosphaté, jouant par rapport à la couche exploitée le rôle de mur souvent irrégulier. Il est susceptible d'être continu sur de grandes étendues ou interrompu de distance en distance sans nulle règle. Cette discontinuité entraîne la fusion, par places, des couches II et I.

D. — *Couche I*, essentiellement formée de sables phosphatés, associés ou non à des calcaires phosphatés, développés à des échelles très variables. Les rapports génétiques des deux parties en présence seront bientôt précisés.

Trois horizons de silex phosphatés y sont intercalés. L'inférieur est réduit à quelques rognons très dispersés sur le même plan; le moyen, distant de 0 m. 60 à 0 m. 70 du précédent, est formé de nodules beaucoup moins espacés; et le supérieur se résout en une table discontinue, puissante de 0 m. 08 à 0 m. 10, située à 0 m. 30-0 m. 40 du deuxième. Quelques centimètres de sables phosphatés le séparent du niveau suivant.

E. — Argiles et marnes très argileuses, de teinte variable, renfermant ou non des rognons calcaires, mesurant au plus 0 m. 40, et nettement ravinée par l'horizon F qui, parfois, les supprime complètement. Très apparent en 1928, ce ravinement n'était plus visible en 1935. Il représente, en conséquence, une perturbation d'extension limitée.

A l'état sec, le dépôt réalise le facies d'une argile grise, gris jaunâtre, gris rosé, gris panaché de rose ou inversement, grise avec zones roses ordonnées concentriquement, et quelquefois verdâtre. Au toucher, le produit est un peu rapeux, comme s'il renfermait des matières finement grenues. Toutes les variétés sont calcarifères, et elles le sont inégalement, ce qui justifie dans une certaine mesure, le terme marne employé concurremment avec argile pour désigner l'horizon. A celui-ci correspond le *faux-toit* des mineurs.

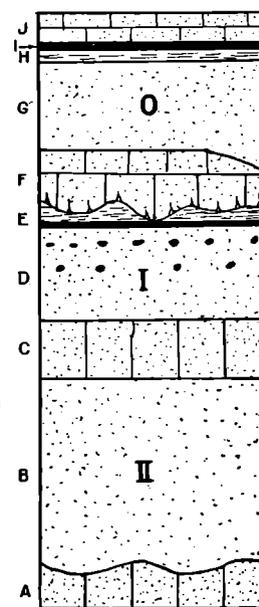


Fig. 64.

F. — « Calcaire phosphaté », à silex rares, d'épaisseur variable (0 m.-1 m. 20), parfois interrompu par amincissement graduel et terminaison en coin. De surcroît, l'horizon ravine les argiles et marnes sous-jacentes. Il débute par un niveau de boudins phosphatés comptant parmi les plus intéressants que j'aie observés. On peut le voir suivant toutes les ondulations du mur argilo-ferrugineux. Par endroits, il se développe à la couronne, où sur des surfaces très étendues, les boudins se montrent entrelacés, en forme de cordons simples ou divisés. En un point où la surface même de l'horizon se voit en contre-empreinte à la couronne, on reconnaît de nombreuses pistes de Vers en relief.

Le niveau F correspond au toit des mineurs.

G. — *Couche O* (0 m. 80-1 m. 50), formée de phosphate meuble avec parties cohérentes à la base. Quelques silex peuvent exister au toit.

H. — « Marnes » à silex (0 m. 10-0 m. 15).

I. — Table de silex.

J. — « Calcaire phosphaté », débutant par une série de boudins phosphatés très visibles à la couronne. Il sert de toit à la couche O, qui a pour faux-toit les marnes à silex H.

Siège de Bou-Iniba. — Pour éviter des redites inutiles, je me bornerai à décrire les dépôts qui surmontent la couche I, et tels que je les ai observés en 1928.

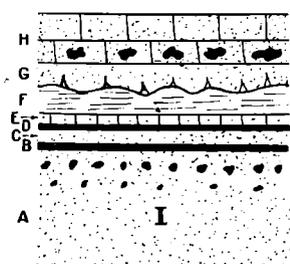


Fig. 65.

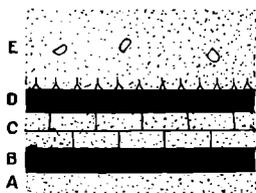


Fig. 65 a.



Fig. 65 b.

A. — *Couche I.*

B. — Silex formant table continue (0 m. 20 au plus), sans inflexion, quelle que soit la composition de la couche I.

C. — Sable (fig. 65) ou « calcaire phosphaté » (fig. 65 a), imprégné ou non par de l'argile ferrugineuse (0 m. 10-0 m. 20).

D. — Table continue de silex phosphaté.

E. — « Calcaire phosphaté » (fig. 65) ou phosphate sableux (fig. 65 a), imprégné ou non d'argile ferrugineuse (0 m. 10).

F. — Argiles et marnes (0 m. 20-0 m. 30).

G. — Phosphate sableux, débutant par un niveau de boudins phosphatés, le tout mesurant une trentaine de centimètres, et ravinant l'horizon précédent.

H. — « Calcaire phosphaté » à silex (0 m. 20-1 m. 20), dont l'épaisseur est sujette à de très rapides changements. Vus en couronne, les silex se détachent avec une morphologie extrêmement compliquée, se traduisant par un aspect annéloïde très accusé. L'horizon peut être remplacé en totalité par les sables phosphatés.

La même coupe (65 b), relevée en 1935, en un point différent, fait ressortir des variantes dans l'ensemble des horizons formant le faux-toit des mineurs. Ap artir de la table de silex couronnant la couche I,

on y observe une succession ascendante de « calcaire phosphaté », sable phosphaté, silex correspondant à la table des l'horizon D de la précédente coupe, puis des marnes, sables phosphatés, marnes, niveau de boudins phosphatés, et, finalement, des « calcaires phosphatés » avec silex, formant le toit proprement dit des mineurs, tout le reste correspondant au faux-toit.

En résumé, il existe sur une épaisseur restreinte des horizons constants et d'autres variables. Et le tout comprend des silex, des « calcaires phosphatés », des sables phosphatés, ainsi que des argiles, des marnes, des boudins phosphatés et une surface de ravinement. Ce que l'on peut

traduire en disant que le régime générateur des dépôts compris entre les couches I et 0 porte la marque d'une grande instabilité, caractérisée, notamment, par des apports argileux.

Descenderie de la Maison rouge. — La recherche, dite n° 2, correspondant à cette descenderie, met en évidence dans un domaine fort restreint d'importants changements de constitution de la couche I. On peut l'observer à l'état sableux, sur 1 m. 98 d'épaisseur, divisée en deux par un horizon de phosphate argileux⁽¹⁾, puissant de 12 centimètres, développé très régulièrement au même niveau. L'horizon a pour toit une table de silex très mamelonnés, visibles en couronne, où leur face inférieure, parfaitement dégagée, revêt un aspect amœbiforme très accentué.

La coupe change vite dans la galerie principale, par addition de calcaire phosphaté, lequel peut envahir la totalité de la masse sableuse du mur au toit.

Il y a dans cette recherche tous les éléments d'une coupe s'étendant jusqu'au-dessus de la couche 0.

GÉNÉRALITÉS.

Les données, fournies par les affleurements, les recherches et l'exploitation dans le domaine des Ouled Abdoun, mettent en pleine lumière un fait qui domine toute l'histoire des phosphates du Maroc et d'autres encore, à savoir une extrême instabilité des conditions du milieu générateur. De cette instabilité le complexe analysé a enregistré une foule de témoignages, tels que *ravinements, perforations, changements de caractères lithologiques, variations de puissance et de composition, etc.* Rien de tout cela n'est nouveau pour nous, mais plus cette instabilité s'affirme générale dans ses manifestations, et plus elle gagne en portée dans l'interprétation des observations qui doivent nous conduire à une synthèse finale.

CARACTÈRES PÉTROGRAPHIQUES DES COUCHES DE PHOSPHATES. — Il en est trois qui sont à souligner tout particulièrement : le grand développement des phosphates meubles, qui assure à l'ensemble du Bassin une physionomie très spéciale; l'intervention de phosphates cohérents, qualifiés de calcaires phosphatés, en liaison intime avec les sables, et le degré de fréquence des coprolithes proprement dits, nulle part ailleurs aussi élevé, à ma connaissance.

La question de l'état physique de ces phosphates soulève un problème qui fera plus loin l'objet d'une étude détaillée, en même temps que seront précisés les rapports génétiques entre sables et calcaires phosphatés.

D'une manière générale, qu'ils soient meubles ou cohérents, les phosphates du Bassin des Ouled Abdoun sont d'aspect très pur, de teinte gris très clair et composés de deux sortes d'éléments phosphatés, abstraction faite des débris de tissu osseux : des grains globuleux de petite taille, non calibrés (moyenne 0 millim. 25-0 millim. 30), constituant toujours le fond du dépôt, et des matériaux beaucoup plus volumineux, à rapporter aux coprolithes typiques, sans parler de la gangue de calcite de la variété désignée sous le nom de calcaire, quelles que soient les proportions relatives de phosphate et de carbonate de chaux. Les coprolithes sont souvent assez nombreux pour imprimer aux phosphates une physionomie grossière, en dépit de leur rôle très secondaire.

Pour ce qui est des grains, bornons-nous, pour l'instant, à noter qu'ils sont limités par une surface lisse et comme polie. Quant aux coprolithes⁽¹⁾, le gisement se prête bien à leur étude,

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les coprolithes des phosphates nord-africains (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCIII, 1936, p. 217-219).

du fait qu'ils sont libres dans le sable, et qu'il est possible d'en collectionner des milliers dans les matériaux éliminés par le criblage des phosphates bruts. Ce sont des éléments de forme généralement cylindrique, dépassant rarement 2 centimètres de long et mesurant au plus un centimètre de diamètre. Leur section transversale est circulaire, et, par exception, elliptique. Complètes, ils sont rétrécis, arrondis à leurs extrémités, et parfois terminés par des cônes surbaissés à sommet arrondi. La surface en est lisse et leur unique ornementation consiste en étranglements transversaux superficiels, non équidistants, toujours peu nombreux, et absents dans la majorité des individus. Beaucoup d'entre eux sont fragmentaires et d'aspect usé. Leur teinte est le plus souvent gris très clair et parfois jaunâtre. Observés *in situ*, ils gisent dans toutes les positions, sans trace de classement, et toujours avec des dimensions extrêmement supérieures à celles des grains phosphatés les plus volumineux. Autant qu'il m'a été possible de m'en assurer, le degré de fréquence des coprolithes en question est sans rapport avec celui des restes de tissu osseux, tout simplement par ce que les uns et les autres ont été remaniés.

Tous les phosphates du Bassin, qu'ils soient consolidés ou non, dégagent par frottement une odeur très prononcée d'hydrocarbures.

MODIFICATIONS SUBIES PAR LES PRINCIPALES COUCHES REPÉRÉES. — Au nombre des témoignages d'instabilité, mis en lumière par l'analyse des gisements, on peut ajouter les changements de toutes sortes qui affectent la couche I, par exemple, sans que celle-ci ait le privilège exclusif de modifier sa puissance, sa constitution et sa composition.

En l'état actuel de l'exploitation, l'épaisseur moyenne de l'unique couche mise en valeur est de 1 m. 80, l'épaisseur totale de la formation phosphatée étant estimée à 20-25 mètres (sauf au sud où elle est presque double). Mais si l'on passe en revue les résultats des recherches qui ont servi à définir le domaine minier, on se trouve en présence de variations considérables.

Il suffit de s'en tenir à quelques exemples pour déclarer son opinion à cet égard. La coupe du puits n° 4 du plateau de Kourigha fixe à 0 m. 90 la puissance de la couche I; celle du puits n° 11 lui assigne 2 m. 60; au puits Guefah 6, elle a été traversée sur 4 m. 80, etc.

Les variations de constitution sont dues à de multiples causes : intervention de « calcaires phosphatés » à des échelles très variables et dans des conditions qui seront précisées plus loin; intercalation d'un horizon marneux, signalé plus haut; transformation en phosphate argilo-ferrugineux. La coupe suivante, relevée à la recherche n° 1 (casse-cou inférieur de la descenderie) de Bou-Jniba, donne une idée d'alternances qu'on peut observer par exception au sein de la couche I, en l'observant de bas en haut :

Phosphate friable.....	0 m. 60
Marne.....	0 m. 20
Phosphate friable et noyaux calcaires.....	0 m. 15
Phosphate friable et noyaux calcaires.....	0 m. 35
Calcaire à points blancs.....	0 m. 20
Phosphate friable.....	0 m. 15
Calcaire phosphaté.....	0 m. 25
Phosphate friable.....	0 m. 12
Silex.	

2 m. 02

A l'opposé d'un pareil type, dénué d'intérêt au point de vue pratique, il faut citer la couche I tout entière sableuse et uniformément riche, dont l'homogénéité serait absolue, n'étaient les cordons de silex signalés plus haut.

En ce qui concerne les couches inférieures à la précédente, leur constitution varie principalement en fonction du rôle joué par les parties meubles et consolidées. Par exemple, tout le phosphate est meuble, ou consolidé à l'état de «calcaire phosphaté» très cohérent, avec d'innombrables intermédiaires entre les deux termes extrêmes. Mais d'une façon générale, l'état cohérent l'emporte de beaucoup.

RÉPARTITION DES TENEURS EN PHOSPHATE DE CHAUX. — La distribution des teneurs en phosphate de chaux n'obéit à aucune règle fixe. Il y a des exemples de teneurs décroissantes de haut en bas, mais il arrive souvent que la couche inférieure ne soit pas la moins riche. Le tableau suivant rassemble quelques données à ce sujet :

Couches	I	II	III	IV
Puits <i>a</i>	74,15	69,12	70,25	69,68
— <i>b</i>	78,05	67,86	"	"
— C.....	46,64	58,37	"	"
— <i>d</i>	77,08	"	71,22	74,07
— Bou-Jniba, n° 1.....	75,41	73,17	68,17	71,22
Descenderie D.....	71,08	69,54	73,03	"
— Seb Bir Haouz.....	74,29	65,49	"	"
Kerkour Ahmed Tounsi 1.....	76,80	64,37	73,17	"
Biar Oulad Tazi.....	75,96	72,19	51,81	"
Ksibet-El-Draben.....	74,85	60,46	54,60	56,83

Ces chiffres font ressortir, non seulement l'irrégularité de la distribution des teneurs, mais la supériorité de la couche I, correspondant, dans la presque totalité des cas, au maximum de concentration.

Absence de critérium des horizons phosphatés, autres que la couche I. — Seule, la couche I est pétrographiquement définie, et elle l'est par ses silex, absents dans les horizons inférieurs, et dont la principale caractéristique est tirée des silex du toit. Quand cette couche n'est pas en vue le numérotage des autres est incertain. A bien regarder les choses de près, on se rend compte que les numéros II, III, IV, V sont attribués aux horizons qui retiennent l'attention, à la fois par leur teneur et leur puissance. Mais il se peut qu'une couche très mince en un point, et de ce chef non classée, acquière assez d'épaisseur ailleurs, pour recevoir un numéro d'ordre. Aussi n'est-il pas du tout certain, par exemple, que toutes les couches III soient rigoureusement de même âge.

La même incertitude règne dans le Bassin de Gafsa (II, p. 503), lorsqu'on tente d'établir un parallélisme entre des couches très éloignées dans l'espace, et cela par suite du régime instable qui a prévalu d'un bout à l'autre du dépôt des phosphates nord-africains.

ANALYSE MICROGRAPHIQUE DES PHOSPHATES DU BASSIN DES OULED ABDOUN.

On doit à Primitivo H. Sampelayo et à Léonce Joleaud les seules données micrographiques dont il y ait lieu de faire état ici.

Le premier a présenté au Congrès géologique international de Bruxelles, en 1922, un bref

résumé d'une Analyse microscopique de phosphates du Nord de l'Afrique et de l'Est de l'Espagne, accompagné de douze belles planches, dont deux étaient consacrées aux phosphates d'Oued-Zem⁽¹⁾. Ledit mémoire a été publié *in extenso*, l'année suivante, avec les mêmes planches⁽²⁾. L'auteur y passe en revue les éléments essentiels, grains phosphatés, coprolithes, organismes et ciment des couches I et II d'Oued-Zem; il en souligne les différences dues à l'existence dans la couche II, d'éléments phosphatés, d'aspect dit oolithique, de coprolithes, de restes de tissu osseux. Tous ces matériaux, qualifiés d'éléments détritiques, représentent 75-80 p. 100 de la roche, le reste se résolvant en une gangue de calcite largement cristallisée.

En 1923, L. Joleaud⁽³⁾ a consacré aux phosphates du Bassin des Ouled Abdoun une étude pétrographique, dans laquelle trois questions d'importance ont été traitées : constitution des phosphates, modifications diagénétiques dont ils ont été le siège, et nature du milieu marin, générateur de ces phosphates. Je dirai plus loin comment il conçoit la formation des phosphates argilo-ferrugineux de Kourigha, répondant à la deuxième question, ainsi que le milieu qui a engendré les phosphates du Maroc. Retenons pour l'instant que L. Joleaud, étudiant les phosphates typiques des Ouled Abdoun, en a fixé le caractère des grains, reconnu le rôle joué par les débris de tissu osseux et décrit les gangues. A sa description, il manque une donnée essentielle. Il s'agit de l'existence du microplankton des grains, parfois invisible dans tous les éléments d'une section mince, voire dans toutes les préparations tirées de multiples échantillons. Quiconque limite son enquête à un petit nombre de matériaux risque de n'en observer aucune trace.

Dans les pages qui vont suivre, j'analyserai successivement :

- A. — Les couches phosphatées d'Oued-Zem.
- B. — Celles de la voie ferrée, lesquelles ajoutées à la série précédente offrent l'avantage de mettre à notre portée la collection complète des horizons les plus importants.
- C. — La formation phosphatée réduite aux couches II, I et 0, visibles dans les travaux des mines.
- D. — Quelques échantillons de phosphates d'El Boroudj qui seront très brièvement décrits.

A. PHOSPHATES D'OUED-ZEM.

COUCHE V, — Non distinguée jusqu'à présent par les auteurs qui ont étudié les carrières d'Oued-Zem, la couche V rappelle à s'y méprendre la physionomie de certaines craies phosphatées du Nord de la France. Le phosphate est teinté en gris clair, ou bruni par de l'oxyde de fer. A la loupe, il se résoud en grains fins, tantôt cimentés par de la calcite très développée, largement cristallisée et comblant tous les vides, tantôt agglutinés par de la calcite grenue, seulement représentée par places. Lorsqu'il en est ainsi, une simple pression des doigts suffit pour désagréger les matériaux en présence.

⁽¹⁾ PRIMITIVO H. SAMPELAYO. — Analyse microscopique de phosphates du Nord de l'Afrique et de l'Est de l'Espagne (*C. R. de la XIII^e Session du Congr. géol. int. de Bruxelles*, 1922, p. 1327-1332, pl. XLI-LII, publié en 1926).

⁽²⁾ *Ibid.* — Análisis microscópico de los Fosfatos del Norte de Africa y del Levante de Espana (*Bol. del Instituto geológico de Espana*, t. XLIV, 3^e série, 1923, 45 p., 22 fot.).

⁽³⁾ L. JOLEAUD. — Les phosphates du Maroc. I. Stratigraphie et pétrographie de la région des Ouled-Abdoun (Maroc oriental) [*B. S. G. Fr.*, 4^e série, t. XXIII, 1923, p. 172-184, pl. VIII].

Au microscope, le dépôt est essentiellement constitué par des éléments de forme générale arrondie, rarement limpides, colorés en gris plus ou moins nuancé de jaune chamois, et envahis ou non par de fines inclusions de nature organique, lesquelles sont susceptibles de les obscurcir complètement. Beaucoup de ces grains doivent uniquement leur défaut de limpidité à une infinité de granulations indéchiffrables, qui n'ont rien de commun avec les impuretés qui souillent ordinairement les éléments phosphatés à des degrés divers. Les inclusions de microorganismes paraissent faire complètement défaut. Quelques grains possèdent un gros noyau calcaire revêtu d'une gaine de phosphate. Plusieurs individus composés, formés d'un élément bien individualisé, emboîté dans un autre, impliquent une genèse en deux temps avec remaniement de l'inclusion.

Les restes de tissu osseux sont nombreux dans chaque préparation, et les coprolithes presque absents. Quelques grains de quartz mesurant, en moyenne 0 millim. 1 de diamètre, et de très rares petits éléments de glauconie figurent dans toutes les coupes minces.

Lorsque le ciment calcaire ne comble qu'une partie des espaces intergranulaires, il tend à se différencier en rhomboédres, parfaits ou non, susceptibles d'être encapuchonnés. Dans le cas où tous les vides sont comblés, il est facile de s'assurer que l'éloignement de beaucoup de grains phosphatés nécessite l'existence d'un ciment originel.

COUCHE IV. — Elle a pour représentant un phosphate relativement très fin, friable, de couleur chamois foncé, dans lequel on ne distingue à la loupe que des grains pressés les uns contre les autres, sans pouvoir identifier un ciment. Au microscope, ils réalisent le même type que ceux de la couche V. Privés de toute trace de microplankton perceptible, ils montrent de temps en temps un commencement d'ordonnance de leurs inclusions de matière organique, lesquelles se groupent à la périphérie en lignes concentriques. Les restes de Vertébrés se sont raréfiés, ainsi que les grains de quartz, plus petits que dans le précédent horizon. Le ciment, qui est loin de combler tous les vides dans l'unique échantillon analysé, se résout en calcite très grenue.

COUCHE III. — D'une certaine cohérence, la roche se décompose en grains phosphatés juxtaposés, plus variés de taille et en même temps plus volumineux que dans la couche précédente. Elle inaugure un grand changement dans la constitution des matériaux phosphatés. On y observe des grains limpides, et d'autres, souillés à toutes les étapes jusqu'à l'opacité complète, en majorité aussi riches en microplankton que les grains du Bassin de Gafsa. Autrement dit, on y trouve d'innombrables valves de *Diatomées*, à tous les états de conservation, auxquelles s'ajoutent, de loin en loin, un petit *Radiolaire*, organismes seulement visibles avec netteté dans les grains les moins riches en matières organiques. Quelques gros éléments renferment des inclusions organiques indéchiffrables.

Les restes de Vertébrés se sont beaucoup multipliés. Un échantillon, prélevé par C. Arambourg, en est formé pour les deux tiers au moins, ce qui le classe parmi les *microbrèches ossifères* typiques. A cet égard, il y a de grandes différences d'un spécimen à l'autre. Quel que soit le degré de fréquence des fragments de tissu osseux, il existe généralement un écart important entre leur taille et celle des grains phosphatés qui leur font cortège, si bien que les matériaux en présence ne témoignent que d'une préparation mécanique très imparfaite. Cette multiplication des débris de tissu osseux n'entraîne nullement une augmentation de fréquence des grains de quartz,

esquels réalisent, au contraire, leur maximum de rareté. L'existence d'une proportion notable de fragments privés de microstructure caractéristique est à souligner.

Rien d'essentiel n'est changé pour le reste. La gangue est composée de calcite largement cristallisée, quand elle ne fait pas défaut.

COUCHE II. — (Pl. XXXIV, fig. 103.) — Elle comprend à la fois des phosphates tendres plus ou moins sableux, et des phosphates très durs, relégués à la partie supérieure de la couche. D'une finesse comparable à ceux de la couche IV, les premiers comportent l'existence de quelques sections de coprolithes blanchâtres, rompant l'uniformité du dépôt. Très cohérente, la seconde variété se distingue à l'œil par une cassure miroitante du ciment, trahissant une cristallisation très large de la calcite, et un grand nombre d'éléments gris blanc, à contours irréguliers ou subcirculaires, mesurant jusqu'à 2 et 3 millimètres, à rattacher aux coprolithes, selon toutes probabilités.

Au microscope, la couche II ne révèle rien de très spécifique; toutefois, on y remarque une notable proportion d'éléments différenciés par trois processus :

1° Des grains bordés d'une étroite zone limpide, limitant la partie principale *b*, que souligne une concentration de matières organiques, susceptibles de la rendre opaque;

2° Des grains différenciés par une structure concentrique très fine, développée dans une couronne superficielle, et parfois sur une grande épaisseur *c*. En l'espèce, l'alignement des particules organiques intervient seul pour engendrer cette structure;

3° Des grains dont le phosphate de la périphérie est différencié en lignes concentriques, hyalines et très fines, sans action sur la lumière polarisée.

Il existe, en outre, des grains doubles, moins rares qu'aux niveaux précédents, dont l'élément-noyau peut être caractérisé par une structure concentrique qui ne s'étend pas à l'enveloppe.

Du point de vue organique, il y a lieu de signaler la fréquence des grains phosphatés privés de Diatomées et de Radiolaires. Ceux qui font exception sont étroitement apparentés aux grains de la couche III.

Les coprolithes continuent à être très rares.

Quant à la gangue, elle est formée de calcite largement cristallisée (*d*), mais elle peut manquer.

COUCHE I. — (Pl. XXXIV, fig. 104.) Le représentant du phosphate exploité à Kourigha est, dans sa partie principale, une roche grise, légèrement jaunâtre, jouissant d'une certaine cohérence, et renfermant quelques coprolithes de petite taille. A sa partie inférieure, elle passe à un pseudo-calcaire phosphaté, véritable phosphate à grain fin, chargé d'un plus grand nombre de coprolithes, dont les sections mesurent jusqu'à 1 centimètre. Cette variété est redevable de sa dureté à l'existence d'un ciment de calcite, très largement cristallisée.

Elle tire sa principale caractéristique de la multiplication des grains différenciés par des matières organiques. En voici les variétés les plus répandues :

1° Grains composés d'une couronne gris noirâtre entourant un volumineux noyau plus ou moins limpide (*b*), ou inversement d'une couronne limpide et d'un noyau profondément souillé par des matières organiques (*c*);

2° Grains divisés en trois parties : une enveloppe très chargée d'impuretés, puis une couronne très pure et au centre, un volumineux noyau ne laissant pas transparaître le fond phosphaté.

La structure concentrique, résultant de l'arrangement des granulations ou de la différenciation du phosphate, est devenue exceptionnelle.

Quelques éléments doubles, voire même triples, ont été observés. Aux complexes remaniés, on ne peut rapporter qu'un ou deux débris par coupe mince (e).

La question des inclusions de microorganismes se présente comme dans la couche II, c'est-à-dire que nombre d'éléments ne laissent voir aucun vestige d'Algues et de Radiolaires. Parmi ces derniers, il en est qui accusent aux forts grossissements une sorte de structure réticulée ultra-fine.

Les restes de Vertébrés sont devenus rares (g), et il s'en faut de peu que le quartz (f) ne soit exclu.

Dans le type dominant, aucun ciment ne retient les grains en de grandes plages, alors que dans la variété très cohérente, ils sont agglutinés par de la calcite largement cristallisée (h), à laquelle s'ajoute, ou non, un peu de matière argileuse.

La composition d'un échantillon de moyenne consistance est la suivante :

S O ²	0,10 p. 100
Al ² O ³	"
Fe ² O ³	"
CaO.....	53,50 —
MgO.....	0,49 —
P ² O ⁵	21,34 —
K ² O.....	0,10 —
Na ² O.....	0,87 —
Fl.....	3,02 —
Cl.....	Traces.
CO ²	12,52 —
H ² O.....	7,78 —
SO ³	1,56 —
	<hr/>
	101,28 p. 100
	<hr/>
Phosphate de chaux.....	46,585 p. 100

COUCHE ZÉRO. — L'horizon est constitué par un phosphate gris clair, tendre, à grain fin, réservant une petite place à des coprolithes, dont les plus volumineux peuvent mesurer 1 centimètre. A la loupe, on ne discerne aucune trace de ciment.

Jamais différenciés, les grains, à quelques exceptions près, sont limpides et pétris de restes de *Diatomées* comme dans la couche III. Chaque coupe en compte plusieurs renfermant des *Radiolaires* admirablement conservés, à raison d'un individu par grain. Comme dans les phosphates tunisiens, on peut observer ces organismes à tous les stades de destruction. Les petits Radiolaires sont rares. Aux restes de Vertébrés on ne peut rapporter qu'un petit nombre de débris.

Généralement contigus, les éléments phosphatés ne sont retenus en place que par un mince liseré de matière argileuse ne remplissant jamais les vides.

RÉSUMÉ. — Les grains de phosphate sont en grande majorité indifférenciés, et presque toujours simples. Suivant les horizons passés en revue, ils sont en totalité dépourvus de microplankton (V et IV), ou pétris, en très grand nombre, de débris organiques, presque tous à rapporter aux *Diatomées*. Lors de leur maximum de fréquence, les grains en sont d'une telle richesse qu'ils rappellent tout à fait ceux du Bassin de Gafsa. Aux *Diatomées* peuvent s'associer les tout petits *Radiolaires* tant de fois signalés. Il existe également, mais en nombre fort restreint, des *Radiolaires* de taille normale, servant de noyaux à des grains et jamais à l'état libre. La couche III se singularise par la présence d'éléments englobant des microorganismes à structure finement réticulée, d'affinités incertaines, relevant, selon toutes probabilités, des *Radiolaires* ou des *Silico-flagellés*. On les retrouve, mais en plus grand nombre, au même niveau, le long de la voie ferrée.

Le degré de fréquence des restes de tissu osseux et des coprolithes est sujet à d'importantes variations. Les premiers sont tellement répandus dans la couche III que le faciès de microbrèche ossifère s'y trouve réalisé.

En moyenne, le quartz est rare, bien que le gisement se trouve en bordure du Bassin.

Les matériaux phosphatés sont, tantôt contigus, et, tantôt, plus ou moins largement séparés. Dans le premier cas, ils sont, ou non, fixés par un ciment. Dans l'étendue restreinte d'une préparation, il peut exister des plages pourvues de ciment et d'autres qui en manquent. L'absence de gangue n'entraîne pas nécessairement l'état meuble, et bien des phosphates qui en sont privés n'en jouissent pas moins d'une faible cohérence, résultant de la soudure des éléments en contact. Presque toujours calcaire, la gangue est, tour à tour, largement cristallisée ou grenue, et il arrive qu'elle soit convertie en rhomboédres, lorsqu'elle laisse des vides entre les grains. Dans les couches I et O, de nombreux éléments sont maintenus en place par une simple pellicule de matière argileuse, enrobant tout ou partie des grains, comme dans certains phosphates de Tunisie et de l'Extrême-Est algérien. Quelle que soit sa constitution, la gangue est complètement dépourvue de restes organiques lui appartenant en propre. Autrement dit, pas une seule *Diatomée* n'est incluse dans le ciment.

B. PHOSPHATES TRAVERSÉS PAR LA VOIE FERRÉE.

Les quatre couches définies dans les tranchées de la voie ferrée présentent au microscope les caractères suivants :

COUCHE IV (Pl. XXXIV, fig. 106). — Des échantillons prélevés en 1928, sans fixer leurs positions relatives, comportent deux types, l'un et l'autre pauvres en matières organiques, et composés de grains généralement limpides.

1° Au premier se rapporte un phosphate dont presque tous les éléments sont pétris de restes de *Diatomées*, parfois admirablement conservés, en quoi il diffère beaucoup des phosphates de la même couche observés à Oued-Zem (p. 679). Plusieurs grains renferment une *Globigérine* phosphatisée, et quelques autres un *Radiolaire* de taille normale. Des *Radiolaires* de dimensions très exigües peuvent figurer au nombre de plusieurs dans un seul et unique grain. Un élément riche en *Diatomées* contient un *Radiolaire* situé en bordure et tronqué, preuve qu'on se trouve

en présence d'un fragment, détaché d'un complexe. Des dizaines d'éléments, dans chaque préparation, sont plus ou moins différenciés par une structure concentrique superficielle (c), appartenant en propre au phosphate, et non engendrée par l'ordonnance de granulations de nature organique. Plusieurs grains sont doubles (e). La taille des éléments varie beaucoup dans l'étendue restreinte d'une même coupe. Aux débris de tissu osseux on ne peut rapporter que deux ou trois fragments par section. Le quartz est pour ainsi dire exclu des préparations. Quant à la gangue, elle est très largement cristallisée (g).

2° La seconde variété répond à quelque chose de très différent. Les grains à Diatomées sont devenus des exceptions, et beaucoup d'éléments paraissent privés d'inclusions organiques. Très nombreux et de taille généralement moins petite, les autres sont caractérisés par des inclusions organiques, dont on pouvait déjà observer quelques représentants dans le premier type. Ce ne sont, ni des Diatomées, ni des Radiolaires à squelette primitivement siliceux. Aux faibles grossissements, elles dessinent des taches de teinte moins claire que le fond phosphaté, de forme générale globuleuse ou irrégulière, très variable et plus ou moins individualisée. Étudiées avec un grossissement de 150 diamètres, elles donnent l'impression de corps spongieux, laissant parfois apparaître des pores très nets. Leur diagnostic offre un grand intérêt, ne fût-ce qu'en raison de leur extrême fréquence et de ce qu'ils constituent la caractéristique fondamentale du second type. Le dessin d'ensemble des formes en question n'a jamais la netteté des coquilles de Radiolaires et de Foraminifères, ainsi que des carapaces de Diatomées, donnée qui met en cause la nature même des parties fossilisées par le phosphate de chaux. Peut-être s'agit-il de Radiolaires privés de squelette siliceux, et voués, en conséquence, à une destruction complète en milieu non phosphaté. L'hypothèse qu'ils relèvent des Silicoflagellés n'est pas à rejeter.

Les débris de tissu osseux sont représentés par quelques unités dans chaque section. Beaucoup plus rares, les coprolithes peuvent manquer dans une préparation donnée.

Le quartz est totalement exclu de certaines coupes, et très rare quand il ne manque pas. La glauconie a été observée à l'état d'inclusion dans deux grains, et jamais en liberté dans le ciment. C'est un fait qui témoigne avec beaucoup d'autres du remaniement des éléments phosphatés.

Tous les échantillons analysés ont un ciment de calcite largement cristallisée.

L'analyse d'un échantillon de la couche IV a donné les résultats suivants :

SiO ²	0,05 p. 100
Al ² O ³	0,88 —
Fe ² O ³	0,32 —
CaO.....	52,90 —
MgO.....	0,36 —
P ² O ⁵	20 —
K ² O.....	0,10 —
Na ² O.....	1,40 —
Fl.....	3,08 —
Cl.....	Traces.
CO ²	15,92 —
H ² O.....	5,18 —
SO ³	1,20 —
	<hr/>
	101,39 p. 100
Phosphate de chaux.....	43,66 p. 100

COUCHE III (Pl. XXXV, fig. 107 et 108). — Elle réunit des phosphates grossiers à la base, ainsi que des phosphates de type normal, cohérents et parfois pulvérulents.

1° A la base, où sont concentrés les galets signalés plus haut (p. 671), la roche est assez cohérente pour que la cassure tranche tous les grains, y compris les nombreux débris de tissu osseux. Au microscope, elle se résout en une *microbrèche ossifère*, formée pour les trois quarts au moins de fragments de tissu osseux, pourvus d'une microstructure des mieux conservées (fig. 107 a) et de débris dépourvus de structure caractéristique (fig. 107 b). Le reste est composé d'éléments d'origine variée, tels que petits galets calcaires à grain très fin, en grande partie ou presque complètement phosphatisés, d'une roche bréchoïde également épigénisée par du phosphate, de complexes renfermant des Radiolaires globuleux, de rares coprolithes, de grains phosphatés (fig. 107 c), le tout plongé dans un ciment de calcite largement cristallisée (fig. 107 e) contenant un nombre infime de granules de quartz, mesurant moins de 0 millim. 10 de diamètre.

2° Le type qui paraît le plus répandu est un phosphate à grains limpides (fig. 108), dont presque tous les éléments sont remplis de carapaces de Diatomées. De rares grains correspondent à un Radiolaire de dimensions normales, bordé d'un peu de phosphate. D'autres, plus rares encore, contiennent un *Foraminifère* à test extrêmement mince. Quelques éléments plus gros que les autres et de forme anguleuse, relèvent autant des Radiolarites que des Diatomées. Ce sont, de toute évidence, des morceaux de roche préexistante.

La constitution des grains phosphatés est sujette à maintes variations :

- a. — Grains doués d'une grande limpidité, exempts d'inclusions (fig. 108).
- b. — Grains riches en inclusions de calcite à contours rongés.
- c. — Grains bourrés de témoins de microplankton, susceptibles d'être pyritisés.
- d. — Éléments de type exceptionnel à structure concentrique très fine et nette.
- e. — Grains doubles, peu répandus.
- f. — Grains fragmentaires très rares.

Les débris de tissus osseux sont fréquents (g). Règle générale, le quartz est absent, quelle que soit la taille des éléments phosphatés. Quand à la gangue, elle est formée de calcite pure très largement cristallisée (h).

3° Une troisième variété s'écarte du type banal par la structure d'une partie de ses éléments. Elle se décompose en grains pour la plupart limpides, dont une faible minorité réserve aux Diatomées une place prépondérante. Quelques-uns seulement, renferment des organismes non identifiables en toute certitude, dont le squelette non siliceux possède un réseau de mailles, très nettes et relativement larges. L'hypothèse faite, pour les nombreux organismes de la couche III d'Oued-Zem qui leur sont étroitement apparentés (p. 679), s'impose à l'esprit. Les autres grains, c'est-à-dire la majorité, ne laissent reconnaître aucun organisme.

De nombreux éléments (fig. 109 a) sont revêtus d'une enveloppe de phosphate très pur,

hyalin, interrompu ou non par de petites divisions radiales, et n'exerçant aucune action sur la lumière polarisée. D'autres, beaucoup moins fréquents, sont différenciés par une structure concentrique, superficielle ou non, le plus souvent sans aucune participation des granulations de matières organiques. Des individus, en petit nombre, sont caractérisés par une structure franchement concrétionnée.

Il en est qui, doués d'une assez grande fréquence, possèdent une texture fibreuse très apparente, caractérisée le plus souvent par le parallélisme des divisions. Ici, encore, aucun diagnostic ferme n'est possible. Tout ce qu'on peut dire d'utile à leur sujet, c'est qu'ils rappellent, à s'y méprendre, des matériaux épigénisés par de la glauconie, dérivés de *Nummulites*, répandus à profusion dans le « tuffeau » (« argilite ») de Morlanwelz (Belgique)⁽¹⁾. Mais il est impossible d'observer la moindre transition à des Rhizopodes de grande taille, susceptibles de fournir les matériaux en question. Il y a lieu de noter que le type précédent renferme un Foraminifère très robuste, à texture fibreuse, ne réservant à l'organisme que de toutes petites loges. Il se peut que le même Foraminifère, connu par un seul individu, ait été représenté par des formes de plus grande taille, toutes morcelées et phosphatisées. A défaut d'une telle solution, il faudrait attribuer à la structure fibreuse en question une origine inorganique, explication qui rend mieux compte de certaines particularités que la première, mais qui n'est probablement pas conforme à la vérité.

Entre les nicols croisés, des grains se révèlent plus ou moins calcarifères, et toujours avec des traces de corrosion à la périphérie des éléments inclus.

Chaque préparation contient un très petit nombre de fragments de tissu osseux et de très rares coprolithes.

De même que la précédente, cette variété réserve une place quelconque peu importante à la gangue calcaire, car il s'en faut que tous les matériaux phosphatés se touchent. Par un mécanisme qu'il est impossible d'identifier en toute sûreté, cette gangue entaille nombre de grains.

Il est tout à fait improbable que ces échancrures soient dues à une action quelconque du carbonate de chaux au moment de sa cristallisation. Il est infiniment plus logique d'admettre que les grains de phosphate en question, à l'exemple de nombreux matériaux glauconieux de certaines craies⁽²⁾, ont subi un phénomène de contraction, générateur de petites incisions, en forme de coins, oblitérés par le carbonate de chaux du ciment.

4° Un autre type, de position inconnue dans l'horizon, n'est pas autre chose qu'un calcaire riche en petits éléments phosphatés, dépourvus d'inclusions organiques, accompagnés de nombreux granules de quartz, les uns et les autres plongés dans une gangue, souvent cristallisée en rhomboèdres, encapuchonnés ou non. Quelques grains de phosphate possèdent un noyau de calcite, lequel peut être un cristal encapuchonné pareil à ceux du ciment. Des différenciations concentriques périphériques sont observées avec fréquence dans les grains.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. géol. Nord*, t. IV, 2, 1897, p. 135, pl. V, fig. 1).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France *Roches carbonatées*, 1935, (p. 44, pl. I, fig. 2).

Un échantillon de la couche III titre :

SiO ²	0,10 p. 100
Al ² O ³	0,36 —
Fe ² O ³	0,64 —
CaO.....	51,10 —
MgO.....	0,57 —
P ² O ⁵	29,74 —
K ² O.....	0,06 —
Na ² O.....	0,35 —
Fl.....	4,33 —
Cl.....	Traces.
CO ²	6,35 —
H ² O.....	5,04 —
SO ³	1,68 —
	<hr/>
	100,32 p. 100
Phosphate de chaux.....	64,922 p. 100

COUCHE II. — Sauf à la base même, où ses caractères sont aberrants, la couche II est de constitution très simple. Elle se décompose en grains phosphatés arrondis, relativement purs, contigus, ou noyés de toutes parts dans une gangue de calcite largement cristallisée. Ces grains sont pétris de restes de *Diatomées*, souvent accompagnées de *Radiolaires* embryonnaires, et parfois de formes réalisant une taille à peu près normale. Quelques types en cloches se rencontrent parmi les individus de dimensions exigües. Les grains, différenciés à la périphérie par une zone hyaline, sont fréquents. Il en est de doubles, voire de triples.

Les coprolithes et les fragments de tissu osseux sont très rares, quant au quartz il est absent dans les coupes minces.

Il en va tout autrement à la base, au contact des boudins phosphatés, où les restes de tissu osseux abondent, en compagnie de grains de quartz clairsemés, et d'éléments étrangers. En l'espèce, les grains de phosphate revêtent un aspect très sale, masquant les inclusions organiques jusqu'à la moindre trace. En sorte que le faciès de la roche ne rappelle guère celui de la masse principale de l'horizon.

L'analyse d'un représentant de la couche II a donné les chiffres suivant :

SiO ²	0,60 p. 100
Al ² O ³	1,82 —
Fe ² O ³	0,48 —
CaO.....	53,80 —
MgO.....	0,18 —
P ² O ⁵	28,40 —
K ² O.....	" —
Na ² O.....	1,06 —
Fl.....	Traces.
CO ²	6,22 —
H ² O.....	4,18 —
SO ³	1,50 —
	<hr/>
	102,24 p. 100
Phosphate de chaux.....	61,997 p. 100

COUCHE I. — Elle se résoud presque invariablement en éléments très limpides, non différenciés, pétris d'inclusions organiques, presque toutes à rapporter aux *Diatomées*, accompagnées de *Radiolaires*, en nombre très restreint. Les coprolithes et fragments de tissu osseux sont rares. Par contre, les grains de quartz comptent plusieurs dizaines de représentants dans chaque coupe de « calcaires phosphatés », subordonnés aux phosphates meubles.

Du fait que cette même couche va être soumise à une analyse minutieuse dans le gisement de Kourigha, il me paraît superflu d'ajouter quoique ce soit aux précédentes généralités.

RÉSUMÉ. — Au total, les éléments phosphatés et les couches elles-mêmes affectent une plus grande diversité que dans la série d'Oued-Zem. Une couche donnée peut comporter des variétés très différentes, témoin l'horizon III.

Du point de vue organique, il est à noter que les *Diatomées* font leur début en grand nombre dans la couche IV, qu'elles disparaissent pour prendre ensuite une part exceptionnellement importante à la constitution des couches II et I. Des *Radiolaires* embryonnaires peuvent les accompagner, et l'on peut observer quelques grains correspondant à des *Radiolaires* de taille normale, remplis et entourés de phosphate de chaux. La couche IV fournit quelques volumineux grains anguleux, extraits d'une roche à caractères mixtes de *Diatomite* et de *Radiolarite*, ainsi que plusieurs éléments renfermant une Globigérine à gros test. Un des faits saillants dans le domaine paléontologique est l'intervention dans la couche IV, à une échelle importante, et dans la couche III, où elles sont beaucoup moins répandues, d'inclusions organiques, d'identification incertaine, déjà signalées en petit nombre dans le groupe d'Oued-Zem, et que je rapporte avec doute à des *Radiolaires* ou à des *Silicoflagellés*.

Chaque fois que l'attention se porte sur les échantillons prélevés à la base des couches, on constate que les fragments de tissu osseux se multiplient beaucoup, en même temps que leur taille augmente. Une variété de la couche III en est tellement riche qu'elle prend rang parmi les *microbrèches*.

En ce qui touche les grains, on assiste à des différenciations plus nombreuses et plus accentuées que dans la série précédente, aboutissant à la formation de grains, entourés d'une auréole hyaline et amorphe, et d'éléments à structure concentrique plus ou moins nette, réalisée par le phosphate même, avec ou sans le concours des impuretés incluses. Notons que les grains ainsi transformés sont fort loin de figurer en première ligne dans les minerais riches et pauvres. L'existence de témoins de calcite rongés a été reconnue dans de multiples éléments. Deux grains appartenant à la couche IV sont pourvus de noyaux glauconieux. Un dernier terme de complication a pour représentants des grains doubles, voire triples, comportant un ou deux remaniements.

Le quartz n'acquiert une notable fréquence que dans les parties modifiées par des ruptures d'équilibre, comme à la base de la couche II, au voisinage de l'horizon de boudins phosphatés.

Les types cohérents sont pourvus d'un ciment de calcite en général largement cristallisée. Par exception, la gangue se résout en rhomboèdres de calcite, encapuchonnés ou non. Une autre anomalie s'observe dans la couche III, dont la calcite du ciment entaille la surface d'une proportion très appréciable d'éléments.

C. PHOSPHATES EXPLOITÉS OU VISIBLES DANS LES MINES DE KOURIGHA.

L'ensemble des horizons auxquels ils correspondent commence avec la couche II et finit avec la couche O (fig. 64, p. 673). Pour éviter les redites sans utilité, mon analyse portera de préférence sur la succession relevée au siège de Bou-Lanouar, qui offre l'avantage d'être complète, depuis la couche II comprise, jusqu'à la couche O incluse. Et chaque fois que je le jugerai nécessaire, j'établirai un parallèle entre les horizons des deux sièges en exploitation.

A. MUR DE LA COUCHE II. — Les préparations tirées du calcaire phosphaté, servant de mur à la couche II, sont avant tout caractérisées par l'association de matériaux de taille très différente, par la fréquence de volumineux éléments anguleux, ainsi que par la multiplication très sensible des débris de tissu osseux.

Ceux-ci ont pour représentants des fragments de toutes formes et, notamment, de fréquentes sections rectangulaires. Les coprolithes paraissent manquer.

Les grains de type banal ne diffèrent en rien de ceux des couches II et I. Comme eux, ils sont globuleux et presque toujours très limpides. L'existence de grains doubles est des plus rares, et celle d'inclusions organiques, visibles aux faibles grossissements, ne l'est pas moins. Le défaut de calibrage des matériaux constituant est poussé très loin, à telle enseigne qu'on peut observer côte à côte des grains dont le diamètre varie du simple au double, au triple et même davantage. Quant aux matériaux anguleux, ils peuvent atteindre des dimensions leur permettant d'occuper le champ du microscope aux faibles grossissements. En dépit de la taille des gros éléments, les grains de quartz se comptent par quelques unités seulement et de très petite taille dans chaque coupe.

La gangue est constituée par de la calcite largement cristallisée comblant tous les vides. Chacun de ses éléments est susceptible d'englober toute une série de grains. Les plages où elle est très développée ne laisse aucun doute sur l'existence d'un ciment primitif, en raison de l'écartement des grains.

B. COUCHE II. — Débarrassé des coprolithes et des restes organiques visibles à l'œil nu, le sable phosphaté subordonné à la couche II est gris blanc, très fin, composé de grains non calibrés, que rien ne distingue à la loupe de ceux de la couche I.

Tous les échantillons observés au microscope sont composés de grains phosphatés, de fragments de tissu osseux et de coprolithes, accompagnés ou non de quelques grains de quartz, et à l'exclusion de microorganismes libres.

De forme arrondie ou subangulaire, les grains de phosphate sont très limpides, légèrement teintés, ou plus ou moins chargés d'impuretés, dont la réunion constitue un pigment qui laisse généralement transparaître les inclusions organiques. A cet égard, il existe d'importantes différences entre les échantillons prélevés en divers points de la mine. La zone périphérique de ces éléments est presque toujours exempte d'impuretés, et, par exception, à la fois hyaline et caractérisée par une amorce de structure concentrique. Il arrive que celle-ci s'étende presque jusqu'au cœur des matériaux. Les exemples d'action de l'auréole hyaline sur la lumière polarisée sont rares. Quelques grains sont doubles.

La plupart des éléments sont remplis de microplankton, sous la forme de restes de *Diatomées*, pressées les unes contre les autres, comme dans le gisement de Gafsa. D'autres en sont beau-

coup moins riches, et il en est qui n'en renferment aucune trace, sans qu'on puisse s'assurer que des valves complètes ou morcelées existaient à l'origine. De rares grains emprisonnent un grand *Radiolaire* intact ou en voie de destruction, représenté à l'extrême limite par de tout petits vestiges, ordonnés de manière à permettre une identification. Bref, ici, comme en Tunisie, les grands Radiolaires sont en régression par rapport à leur degré de fréquence originel. Il existe dans chaque préparation et dans plusieurs éléments des organismes, irréguliers de forme, dont le squelette se résout en un tissu lâche, à grandes mailles irrégulières que j'attribue au même groupe sans la moindre preuve à l'appui. Des Radiolaires, dits embryonnaires, peuvent accompagner les Diatomées.

La présence de fragments de tissu osseux est constante dans les coupes minces, mais la proportion en varie beaucoup selon les niveaux étudiés. Ici, on compte un ou deux fragments par section, alors que là, c'est par dizaines qu'ils se chiffrent. La fragmentation des restes de tissu osseux en des sortes de fragments de forme générale prismatique, acquiert parfois une certaine fréquence. Quelques-uns des pseudo-prismes observés, sectionnés sur place, montrent les tronçons plus ou moins écartés de leur position première. Il en est des débris de tissu osseux, comme des coprolithes, en ce que la plupart ont une taille supérieure à celle des grains phosphatés.

Le degré de fréquence des coprolithes, entiers et surtout fragmentaires, comporte également des variations. De rares qu'ils sont dans un type donné, ils deviennent relativement abondants dans un autre.

A l'état meuble, le dépôt possède généralement un ciment calcaire des plus rudimentaires, qui suffit pour maintenir en place les matériaux et les empêcher de s'écouler à la façon des grains de sable siliceux. Lorsque la roche est cohérente, les grains de phosphate sont contigus, mais il y a des exceptions qui impliquent l'existence d'un ciment originel. La calcite remplit plus ou moins les vides, sous forme d'éléments largement cristallisés, de grains, ou, moins fréquemment, d'un léger enduit tapissant les vides, en s'interrompant au contact des éléments.

On peut tirer de l'examen de cette calcite un excellent argument contre la notion de décalcification, invoquée pour expliquer l'état plus ou moins meuble du phosphate. Si l'on passe d'une plage dont les grains ne sont guère maintenus en place que par une faible adhérence, avec ou sans le concours d'une insignifiante proportion de calcite, à une plage voisine dont les vides sont remplis de calcite, on ne constate jamais la plus petite trace de corrosion de celle-ci à la fonction des deux manières d'être. Et comme il s'agit d'une règle absolument générale, il est clair que l'absence ou la rareté du ciment, qui rendent le phosphate plus ou moins meuble, ne résultent pas de l'élimination d'une gangue calcaire. Notons que l'horizon est redevable de son infériorité par rapport à la couche I uniquement à l'intervention du ciment dont il vient d'être question.

BOULETS CALCAIRES DE LA COUCHE II. — On désigne de la sorte des rognons très irréguliers de forme, ornés de protubérances, dont la surface est hérissée d'aspérités, principalement constituées par les éléments grossiers du milieu, et subordonnés au phosphate meuble.

Ils diffèrent du minerai typique de la couche par un double caractère : les vides en sont exclus, et des plages, pourvues d'un ciment exceptionnellement développé, montrent des grains phosphatés, largement isolés de toutes parts dans la calcite de la gangue. Rien n'est plus évident que cette gangue date de la sédimentation même, sinon les grains, non maintenus en place, par une armature calcaire auraient subi un phénomène de tassement pour réduire au minimum les

espaces vides. Il est non moins certain que la place des boulets a été marquée, dès le principe, par une plus grande concentration de calcaire que partout ailleurs. Que ce calcaire ait servi de centre d'attraction pour le carbonate de chaux en circulation dans le milieu, l'hypothèse en paraît très plausible. Dans ces conditions, la matière des boulets aurait une origine double. Une partie dériverait d'une vase calcaire agglutinant les grains phosphatés sur le fond de la mer; l'autre aurait pris naissance secondairement, peu après le dépôt des matériaux et sous la mer.

C. MUR DE LA COUCHE I (pl. XXXV, fig. 110). — Désigné sous le nom de calcaire phosphaté, il réalise dans les deux sièges de Bou-Lanouar et de Bou-Jniba le caractère d'un beau phosphate, à ciment de calcite miroitant ou non à l'œil nu. L'état d'agrégation est souvent tel que la cassure tranche les matériaux phosphatés. Mais la consistance peut être moindre, et l'état cristallin de la gangue non perceptible sans le secours d'une loupe. Des échantillons sont tellement riches en coprolithes qu'ils en sont grossiers.

Au microscope, les grains de phosphate se montrent généralement moins rapprochés que dans la couche I, et complètement isolés de tous côtés, en de certaines plages. Aussi est-il hors de doute que la somme des espaces réservés à la gangue est plus grande que celle des vides du phosphate meuble. Telle est au fond la différence essentielle entre les deux types.

Les grains phosphatés, relativement très purs en moyenne, sont généralement indifférenciés dans toute leur épaisseur (*a*), et simples à de très rares exceptions près (*c*). Quelques individus sont pourvus d'une auréole plus pure que le reste. Des valves de *Diatomées*, particulièrement fragmentaires, ne sont visibles que dans une fraction des grains; au surplus, il n'est jamais possible d'observer des éléments d'une richesse en microplankton comparable à celle des matériaux de Gafsa. De loin, en loin on reconnaît un *Radiolaire* embryonnaire, en compagnie des Diatomées, et non moins rarement un *Radiolaire* de taille normale, formant à lui seul un grain entouré d'une gaine phosphatée. Un tronçon de spicule, paraissant se rattacher aux *Spongiaires*, figure également parmi les inclusions.

Les fragments de tissu osseux sont rares ou revêtent une certaine fréquence. Quant aux coprolithes, ils se rencontrent à raison d'un ou plusieurs représentants dans chaque coupe mince.

La gangue, composée de calcite largement cristallisée (*d*) est, le plus souvent dépourvue de quartz. Ce minéral n'existe jamais qu'à l'état de tous petits granules.

Un échantillon de calcaire phosphaté du mur de la couche I, prélevé à Bou-Jniba titre :

SiO ²	0,10 p. 100
Al ² O ³	0,46 —
Fe ² O ³	0,24 —
CaO.....	53,30 —
MgO.....	"
P ² O ⁵	24,32 —
K ² O.....	0,13 —
Na ² O.....	0,95 —
Fl.....	1,65 —
Cl.....	"
CO ²	13,17 —
H ² O.....	3,83 —
SO ³	1,32 —
	<hr/>
	99,47 p. 100
Phosphate de chaux.....	53,09 p. 100

L'échantillon analysé renferme un petit îlot de phosphate argilo-ferrugineux (*e*) isolé de toutes parts, dont la constitution et les rapports avec le phosphate à ciment de calcite intéressent au premier chef la question de l'origine des phosphates argilo-ferrugineux (p. 708).

D. COUCHE I (Pl. XXXVI, fig. 111). — On sait qu'elle se présente sous le double faciès de sables et de phosphates cohérents, et que, seuls, les sables sont exploités, bien que les «calcaires phosphatés», moins riches de par la présence d'une gangue non minéralisée, réalisent de belles teneurs. Débarrassé par tamisage des matériaux autres que les grains libres, le sable se montre très fin et pur, avec une coloration gris blanc. Les éléments arrêtés par le tamis comprennent des débris organiques, des coprolithes entiers ou fragmentaires et souvent quantité de petits agglomérats de graines phosphatées de taille fort variable, dont le type est un complexe d'éléments cédant facilement sous la pression des doigts. Il en existe un grand nombre mesurant depuis environ 1 millimètre, c'est-à-dire réunissant seulement quelques grains jusqu'à 1 centimètre et plus. Soumis à l'action de l'acide chlorhydrique, tous font effervescence, et parfois très vivement, particularité d'importance pour fixer l'état physique originel des phosphates du Bassin de Kourigha.

Au rebours de ce qui se passe dans les phosphates meubles, dont les éléments sont tout naturellement juxtaposés, il peut exister dans les phosphates cohérents des plages dont les grains s'espacent au point qu'ils ont dû être agglutinés à l'origine pour rester définitivement séparés.

La règle est que les grains soient indifférenciés dans toute leur épaisseur (*a*), mais les individus caractérisés par une différenciation superficielle ne sont pas extrêmement rares (*c*).

Tels que je les ai observés, les matériaux phosphatés se prêtent mieux à l'analyse des inclusions que ceux de la couche II. Ils sont pourvus en très grande majorité de *Diatomées* réduites à un état extrêmement fragmentaire (*d*) à l'exclusion, le plus souvent, de toute forme intacte dans une coupe mince donnée, si bien que les individus dans lesquels il est possible d'en étudier deux ou trois sont l'exception. Cette règle n'est pas absolue, car parmi les phosphates argilo-ferrugineux, subordonnés à la couche I et dont il sera question plus loin, il s'en trouve qui renferment de très nombreuses *Diatomées* photographiables.

Dans nombre de grains, une place est réservée à une ou plusieurs masses spongieuses, de forme variable et irrégulière, comportant un réseau extrêmement délicat et lâche, d'aspect hyalin, de nature certainement organique. J'hésite, comme je l'ai fait plus haut, en présence d'inclusions du même type, entre les Radiolaires et les Silicoflagellés (p. 41, et p. 43). L'existence de ce dernier groupe n'en est pas moins certain, grâce à plusieurs formes qui en réalisent nettement les caractères. La proportion de grains à *Radiolaires* paraît un peu moins restreinte qu'en Algérie et Tunisie, la région de M' Dilla exceptée. Conformément à ce que nous avons observé jusqu'à présent ces Radiolaires procèdent pour la plupart de la sphère, et ce n'est que de loin en loin qu'on rencontre une forme en cloche. En règle général, l'ornementation des coquilles est très réduite. Font exception de très rares individus, pourvus d'épines très déliées, parfaitement conservées. Presque tous les Radiolaires observés sont entourés d'une petite auréole phosphatée ou inclus dans des grains dont ils occupent généralement le centre. Parmi ces derniers, il en est qui sont usés d'un côté. A l'état libre, ces organismes sont des plus rares. De même que dans les phosphates tunisiens le nombre de Radiolaires indetifiables dans chaque coupe mince est inférieur à ce qu'il fut à l'origine. C'est ce que nous révèlent des formes en voie de destruction,

finalement représentées par des vestiges, dont l'ordonnance seule est révélatrice de leur identité. Aussi y a-t-il toutes raisons de conclure que des Radiolaires ont été détruits, et qu'ils ont été, de ce chef, une source de silice. Les Radiolaires, dits embryonnaires, ne manquent pour ainsi dire jamais dans les coupes minces, où ils sont rares en moyenne.

Comme dans la couche II, mais dans une proportion très réduite, il existe des grains dans lesquels il est de toute impossibilité de discerner la moindre trace organique. Tout ce qu'on peut dire de certain à leur égard, c'est qu'ils passent par toutes les transitions (*b*) à ceux qui en sont pétris. Selon toutes probabilités, il s'en trouve parmi eux qui se sont assimilés la totalité de leurs inclusions organiques, et peut-être d'autres qui n'en ont jamais possédés. Rares sont les éléments renfermant des témoins de calcite, mais il en est qui en contiennent de très importants, invariablement corrodés et parfois d'aspect squelettique.

Fragments de tissu osseux et coprolithes, entiers ou brisés, fournissent matière aux mêmes observations que la couche II. Très clairsemés dans une coupe (fig. 111 *e*), ils représentent, dans une autre, un élément (fig. 112) essentiel, ne fût-ce que par leur taille, ce qui est surtout vrai pour les coprolithes. Il en est de ceux-ci qui sont on ne peut mieux caractérisés par la microstructure, que j'ai comparée à celle de la pâte de certains porphyres pétrosiliceux. D'autre part, ils sont comme toujours, d'une isotropie intégrale et complètement dépourvus d'inclusions, tant organiques que minérales.

Des échantillons fournissent des préparations dont les grains restent en place, sans l'ombre de ciment visible. C'est à de pareils matériaux que correspondent tout naturellement les teneurs les plus élevées. Il en est d'autres qui présentent une amorce de cimentation par de la matière argileuse, réduite à une très fine pellicule, tapissant les vides intergranulaires, et s'interrompant au contact des grains. Au fond, la proportion de cette matière est extrêmement faible en général, mais suffisante pour retenir les éléments en place. Les exemples montrant tout au plus quelques vides, entièrement comblés par cette substance, sont des plus rares. Enfin, la calcite intervient à des degrés divers pour établir une transition au « calcaire phosphaté », intimement associé au sable. On peut la voir cimentant la plupart des grains, en laissant des îlots privés de gangue. Quand elle se raréfie, cette calcite laisse prédominer les grains libres.

Le quartz, en petites granules, participe à la constitution du minerai dans une mesure presque négligeable. On ne l'observe que là où il y a ciment calcaire dans lequel il est inclus. *Le fait que les granules sont isolés dans la calcite prouve à l'évidence que le carbonate de chaux est originel. Et cet autre fait que dans les échantillons privés de ciment, on ne trouve pas de granules libres entre les grains phosphatés démontre, en outre, que l'état meuble n'a pas été acquis secondairement par décalcification.* D'autres éléments de démonstration seront mis à contribution en temps utile.

« Calcaire » de la couche I. — Les produits de la différenciation de la couche I, sous forme de rognons et d'amas, susceptibles d'envahir la totalité des sables, constituent un seul et même type de roches au microscope. Le soit-disant calcaire subordonné à la couche I est un phosphate différant des parties exploitées par un double caractère : ciment de calcite, très largement cristallisé, comblant tous les vides, et tendance très marquée à la non juxtaposition des grains, parfois réalisée sur de grands espaces, à telle enseigne qu'une pareille gangue ne peut être que primitive. Autrement dit, les matériaux étaient reliés à l'origine par une vase calcaire, convertie en calcite à un moment donné.

Entre autres particularités à mentionner, je signalerai l'inclusion dans quelques éléments phosphatés d'un granule de quartz tout petit, de même taille et de même morphologie que les très rares représentants de ce minéral dans la gangue, et la présence, de loin en loin, d'un témoin de calcaire rongé.

Un échantillon quelconque du calcaire phosphaté subordonné à la couche I du siège de Bou-Lanouar a fourni la composition suivante :

SiO ²	0,25 p. 100
Al ² O ³	0,60 —
Fe ² O ³	0,40 —
CaO.....	50,62 —
MgO.....	0,50 —
P ² O ⁵	20,22 —
K ² O.....	0,17 —
Na ² O.....	0,49 —
Fl.....	2,05 —
Cl.....	Traces.
CO ²	14,03 —
H ² O.....	7,57 —
SO ³	0,95 —
	<hr/>
	97,85 p. 100
Phosphate de chaux.....	44,14 p. 100

E. « ARGILE FERRUGINEUSE DU FAUX-TOIT DES MINEURS (Pl. XXXVII, fig. 113). — L'horizon, d'aspect argilo-ferrugineux, qui surmonte la couche I est à proprement parler un *phosphate argilo-ferrugineux calcarifère*, qu'on peut, à la rigueur, qualifier de *phosphate marneux et ferrugineux*. Point important, ce n'est jamais un phosphate simplement argileux.

Les grains de phosphate sont généralement isolés de toutes parts (*a*) dans une gangue de nature complexe, renfermant un fond de matière argileuse (*b*), voilée par de l'oxyde de fer, qu'on ne peut résoudre en particules constituantes, et pigmentée par des granulations de la même substance. Cette matière polarise dans des tons très élevés et vifs du premier ordre. Elle emprisonne des grains de quartz (*d*) à raison de plusieurs centaines dans chaque coupe mince. Les gros mesurent 0 mm. 13 de plus grand diamètre. Un second élément, plus répandu que le précédent, est constitué par de la calcite en grains, granules et rhomboèdres (*c*), ne portant aucune trace de corrosion, ni les uns ni les autres, et souvent groupés en très grand nombre dans une plage donnée. Les grains et granules sont, tantôt irréguliers de forme, tantôt, et le plus souvent arrondis et, tantôt, parfaitement globuleux. Cette gangue qui est, à elle seule, un sédiment complet, n'a rien d'un résidu de décalcification.

L'analyse incomplète d'un échantillon a fourni les résultats suivants :

P ² O ⁵	20,12 p. 100
Al ² O ³	4,35
CO ²	7,00 —
CaO.....	34,00 —
Fe ² O ³	2,45 —

correspondant à 43,921 p. 100 de phosphate de chaux.

Tout compte fait, l'horizon en question correspond à un changement de régime très prononcé, amenant en quantité des produits de la terre ferme, tels que argile et quartz, tout en faisant une place prépondérante au phosphate de chaux. Il s'agit, ni plus ni moins que d'un épisode et d'un trouble dans la sédimentation phosphatée.

F. «CALCAIRE PHOSPHATÉ» (Pl. XXXVII, fig. 114). — Les échantillons analysés appartiennent, soit à un phosphate de même type et presque aussi riche en grains que celui de la couche I, et généralement contigus, soit à un phosphate composé de grains relativement volumineux, l'un et l'autre pourvus d'une gangue de calcite largement cristallisée. D'une pureté, supérieure à toutes les autres, la roche tire sa principale caractéristique de la fréquence relative des grains de quartz, pour la plupart enrobés dans une gaine de phosphate. D'autres éléments, ceux-ci peu nombreux, sont libres dans la gangue. Remarquablement arrondis (*a*), les grains phosphatés contiennent presque tous un résidu de vase à *Diatomées* (*b*); plusieurs d'entre eux renferment un grand *Radiolaire*. De très rares matériaux englobent une ou plusieurs algues filamenteuses. On retrouve la calcite en petites inclusions dans quelques grains.

Un échantillon prélevé dans la galerie Abdounia, à Bou-Lanouar, présente la composition suivante :

SiO ₂	13,70 p. 100
Al ₂ O ₃	0,98 —
Fe ₂ O ₃	0,39 —
CaO.....	43,80 —
MgO.....	0,30 —
P ₂ O ₅	19,23 —
K ₂ O.....	0,15 —
Na ₂ O.....	2,75 —
Fl.....	1,48 —
Cl.....	Traces.
CO ₂	13,54 —
H ₂ O.....	2,86 —
SO ₃	1,03 —
	<hr/>
	100,14 p. 100
Phosphate de chaux.....	41,979 p. 100

Les débris de tissu osseux (*c*) sont très clairsemés et les coprolithes à peine représentés dans les spécimens analysés.

La gangue est composée de calcite largement cristallisée.

G. COUCHE O (Pl. XXXVII, fig. 115). — De même que la couche I, elle est tour à tour meuble et cohérente. Dans la galerie Abdounia, où l'état pulvérulent a pris un grand développement, la couche O est représentée par un sable gris blanc, très fin. Sous forme de «calcaire phosphaté», elle possède un ciment de calcite, assez développé pour isoler la plupart des grains de phosphate. Par exception, de grandes plages ont tous leurs éléments juxtaposés. D'autres, généralement petites, sont exemptes de gangue, l'exagération de cette manière d'être engendrant la variété meuble. Il en est également, mais de très rares et d'exiguës, qui sont envahies par un peu d'argile.

On y observe la gamme habituelle des grains phosphatés. Les formes globuleuses et pures sont très répandues (a); maints individus ont conservé des débris de microplankton (b).

Le degré de fréquence des débris de tissu osseux et des coprolithes intervient pour beaucoup dans les faciès de l'horizon. Leur multiplication peut être telle que j'ai recueilli, en 1928, des échantillons à texture grossière, composés de coprolithes dans la proportion d'environ 50 p. 100. Ces coprolithes, mesurant jusqu'à 5 millimètres de diamètre, ont été rassemblés par une préparation mécanique très avancée. Des coupes sont pauvres en restes de tissu osseux (d); d'autres en contiennent plusieurs dizaines. Parmi eux, se trouvent, en forte proportion, des débris très allongés comme des prismes, privés de toute trace de microstructure.

Chaque section renferme au moins une dizaine de *Radiolaires*, conservés à raison d'un individu par grain. Plusieurs éléments de grande taille contiennent des algues filamenteuses. Peu de *Diatomées* se laissent identifier, bien que le groupe soit représenté par de minuscules débris de grande diffusion.

Le quartz (e) est resté fréquent, mais il l'est moins que dans le « calcaire phosphaté » sous-jacent.

Quant au ciment de calcite, il est largement cristallisé comme dans les horizons inférieurs.

Une fois de plus, on constate que les calcaires, dits phosphatés du gisement, sont en réalité des phosphates calcaires.

L'analyse d'un calcaire phosphaté emprunté à cet horizon correspond au tableau suivant :

SiO ₂	1,10 p. 100
Al ₂ O ₃	0,78 —
Fe ₂ O ₃	0,32 —
CaO.....	53,60 —
MgO.....	0,54 —
P ₂ O ₅	22,70 —
K ₂ O.....	0,05 —
Na ₂ O.....	1,75 —
Fl.....	0,80 —
Cl.....	Traces.
CO ₂	14,16 —
H ₂ O.....	4,49 —
SO ₃	1,15 —
	<hr/>
	101,44 p. 100
Phosphate de chaux.....	49,554 p. 100

H. «MARNES». — On désigne par ce vocable un petit niveau de *phosphate à ciment argilo-ferrugineux*, susceptible de manquer. L'exclusion du carbonate de chaux en est plus ou moins complète. Des échantillons prélevés dans la galerie Abdounia font très faiblement effervescence aux acides. Tous les matériaux phosphatés sont isolés dans cette gangue, et parfois largement. Le quartz compte des représentants presque aussi nombreux que dans le phosphate argilo-ferrugineux calcaire (F). Il s'agit manifestement d'un dépôt et non d'un résidu de dissolution.

Le produit argileux, qui sert de gangue, est tout entier biréfringent, mais il l'est moins que dans l'horizon F.

J. «CALCAIRE PHOSPHATÉ» (Pl. XXXVII, fig. 116). — Ce niveau, pétri de boudins phosphatés à la base, rentre lui aussi dans la catégorie des *phosphates à ciment de calcite*. Il se signale par un défaut de calibrage des grains, très accentué, et par le grand nombre d'éléments volumineux, caractère qui marche de pair avec la disparition à peu près complète du quartz déritique. Plus les matériaux phosphatés sont volumineux, et plus les restes de tissu osseux se multiplient. On les compte par dizaines dans les préparations des variétés les plus grossières. La tendance à engendrer des formes prismatiques, par fragmentation, s'observe dans les types dont les grains sont les moins volumineux.

L'échantillon qui a fourni la préparation photographiée est de constitution très uniforme. Ses grains recèlent généralement une forte proportion de débris indéchiffrables de microplankton (*a*). Quelques individus (*b*) renferment, un *Radiolaire* centré, d'excellente conservation.

Un échantillon de type moyen présente la composition suivante :

SiO ₂	0,05 p. 100
Al ₂ O ₃	0,16 —
Fe ₂ O ₃	0,24 —
CaO.....	53,80 —
MgO.....	Traces.
P ₂ O ₅	21,15 —
K ₂ O.....	0,10 —
Na ₂ O.....	0,45 —
Fl.....	2,50 —
Cl.....	Traces.
CO ₂	18,20 —
H ₂ O.....	2,70 —
SO ₃	0,86 —
	<hr/>
	100,21 p. 100
	<hr/>
Phosphate de chaux.....	46,17 p. 100

Les silex de la formation phosphatée (Pl. XXXVIII, fig. 117). — Qu'ils soient en lits continus ou en rognons isolés, voire très disséminés, les silex de la couche I et des quelques horizons supérieurs analysés, ont entre eux un air de famille très accentué au microscope. Les caractères en peuvent être synthétisés de la manière suivante :

1° La gangue est constituée par de la calcédonite cryptocristalline, complètement dépourvue de témoins calcaires et de rhomboèdres de calcite, en quoi elle réalise complètement la manière d'être des silex de la craie les plus typiques, et diffère beaucoup de celle de la grande majorité des silex de la formation phosphatée de Tunisie et de l'Est algérien.

2° D'une façon générale, cette gangue est suffisamment développée pour que les grains phosphatés s'y trouvent tous isolés, ou peu s'en faut et, sauf pour les silex de la couche I, ils le sont très largement et, parfois, au point de laisser la prépondérance au ciment. Dans le cas des accidents siliceux de la couche I, développés indifféremment dans le phosphate meuble et dans le phosphate calcaire consolidé, il est hors de doute que les parties silicifiées correspondent toujours à un dépôt composé à l'origine de grains de phosphate, plongés et presque toujours isolés dans une vase calcaire destinée à former un ciment de calcite. Par exemple, l'horizon de silex continu du sommet de la couche I, était originellement un lit de grains de phosphate, emprisonnés dans une vase calcaire.

Bref, il est de règle absolue qu'en milieu phosphaté, la silicification se fasse exclusivement aux dépens du carbonate de chaux et que la genèse des silex ne résulte jamais d'un comblement de vides intergranulaires par de la silice⁽¹⁾. Dans tous les cas, la place des accidents siliceux est marquée à l'avance, soit par l'existence du carbonate de chaux d'origine sédimentaire, soit par un plus grand développement de ce même carbonate.

3° La comparaison des grains de phosphate inclus dans les silex, des grains libres dans les phosphates meubles et des grains des phosphates à ciment calcaire fait ressortir une différence notable. Quel que soit l'horizon en vue, les grains des silex sont toujours plus teintés que les autres. Le fait est particulièrement accentué dans les silex du cordon moyen de la couche I de Bou-Jniba. Les matériaux phosphatés des silex ont donc gardé une pigmentation qui a disparu en totalité, ou tout au moins en très grande partie dans les grains non agglutinés par la silice. Aussi sont-ils caractérisés, d'une manière générale, par un pigment, uniformément distribué ou non qui leur assure une teinte café au lait plus ou moins prononcée, ou par des punctuations, des mouchetures, des taches, qui leur communiquent un aspect souillé et hétérogène.

Dans le cas particulier des silex du cordon moyen de la couche I de Bou-Lanouar (p. 673), dont la figure 117 fournit une excellente idée, les principales modalités réalisées par les éléments phosphatés sont les suivantes :

- a. Grains plus ou moins riches en punctuations noires extrêmement fines et plus ou moins serrées;
- b. Grains rendus en partie opaques par les mêmes inclusions développées à dose massive;
- c. Grains ne laissant discerner aucune trace de phosphate de chaux en section mince, tant le pigment est concentré;
- d. Éléments envahis à des degrés divers, trahissant une ordonnance concentrique plus ou moins des inclusions hydrocarburées;
- e. Grains dont les hydrocarbures sont concentrés en une mince couronne très bien individualisée, voisine de la surface;
- f. Grains du type précédent avec concentrations des inclusions dessinant des sortes de noyaux.

Autrement dit, nous retrouvons dans ces silex la pigmentation des phosphates imprégnés d'hydrocarbures. Et comme cette pigmentation fait défaut le plus souvent, ou qu'elle est pour le moins extrêmement atténuée dans les phosphates dépourvus de gangue, ou cimentés par de la calcite, on est fondé à conclure que *les phosphates du Bassin de Kourigha*, comme ceux de Tunisie et de l'Est algérien ont été fortement imprégnés d'hydrocarbures à l'origine, sans qu'il soit démontré que l'imprégnation ait été égale de part et d'autre.

Par voie de conséquence, se dégage l'enseignement que la silice est, en l'espèce, un milieu plus conservateur de l'imprégnation hydrocarburée que le phosphate lui-même. Pareille constatation a été faite au cours de l'étude des phosphates tunisiens⁽²⁾.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte géol. dét. France*, 1929, p. 687-689).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — L'imprégnation hydrocarburée des phosphates nord-africains et son origine (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCIII, 1936, p. 641).

Ibid. — Les phosphates de chaux sédimentaires de France (*Et. Giles Mén. France*, t. II, 1941, p. 387).

4° En fait d'organismes inclus dans les grains phosphatés des silex, on ne reconnaît que des *Radiolaires* non phosphatisés de taille normale et de très bonne conservation. Impossible d'identifier une seule Diatomée et, qui plus est, d'en reconnaître des débris. La presque totalité du microplankton a donc disparu des grains. On est tout naturellement tenté de conclure que cette disparition est liée à la formation des silex, en tant que source de silice. Mais alors se pose la question de la conservation des *Radiolaires* dans un milieu où les Diatomées disparaissent en totalité. Les silex de la couche I renferment également des *Radiolaires* libres dans la gangue. Y compris ceux qui gisent dans les grains, on en peut compter une bonne dizaine par coupe mince.

Il est de règle que l'exclusion des spicules de la gangue siliceuse soit absolue. A cela près, l'histoire des silex est calquée sur celle des concentrations siliceuses de la craie, c'est-à-dire que l'origine de la silice est organique dans les deux cas.

RÉSUMÉ. — Du point de vue théorique, les couches II, I et O, ainsi que les phosphates calcaires qui les séparent, ne diffèrent par rien d'essentiel. Les grains phosphatés sont cimentés ou non, particularité entraînant les différences de teneur en phosphate de chaux qui décident de la mise en valeur ou non des dépôts.

Dans le domaine des grains phosphatés, les trois horizons ne sont séparés que par des nuances d'importance très secondaire, sans doute appelées à disparaître si l'analyse portait sur un très grand nombre d'échantillons. La vérité est qu'en présence d'une coupe mince, il est de toute impossibilité de dire qu'elle est tirée de telle ou telle couche. Les conditions de genèse des grains sont donc restées comparables, sinon tout à fait pareilles, depuis et y compris la couche II jusqu'à la couche O incluse.

Ces grains sont généralement indifférenciés, sauf dans la couche II, où de nombreux éléments sont pourvus d'une zone superficielle hyaline. D'un bout à l'autre de la série, ils renferment en proportion variable, un résidu de microplankton, qu'on peut rapporter, lorsque l'état de conservation le permet, à des carapaces de *Diatomées* très prépondérantes. Par exception, on tire de ces phosphates des préparations d'une richesse en *Diatomées* comparable à celle des coupes des phosphates de Gafsa. Une petite place est réservée à des *Radiolaires* lilliputiens et à des formes de grande taille, représentées, à raison d'une coquille par grain et de quelques individus, voire d'une dizaine, à tous les états de conservation, par coupe mince. A ce même groupe de *Radiolaires*, je rapporte, non sans quelque doute, des formes spongieuses pourvues d'un réseau très délicat, que peut-être il faut attribuer aux Silicoflagellés. Les microspicules, si répandues dans les phosphates tunisiens et de l'Est algérien, ainsi que les Foraminifères, sont exclus. Un seul et unique fragment de spicule d'*Eponge* a été observé.

Rares sont les éléments qui renferment des témoins de calcite rongée, ou des granules de quartz.

Comparés aux grains de phosphate de l'Est algérien et de la Tunisie, ceux des couches analysées se signalent invariablement par l'absence des inclusions noirâtres qui obscurcissent plus ou moins complètement une foule d'éléments de ces phosphates. Par voie de conséquence, on n'y retrouve pas les Diatomées, les *Radiolaires* dits embryonnaires et les microspicules fossilisés par des matières hydrocarburées, ainsi que les granules et granulations informes de même nature, qui font cortège aux micro-organismes réalisant cette manière d'être. Il en résulte une différence

profonde dans la physionomie des matériaux, différence qui se traduit, notamment, par une imprégnation hydrocarbonnée réduite au minimum, invisible au microscope, mais toujours perceptible à l'odorat, et, en même temps, par une pureté plus grande. Je rappelle, à cet égard, l'enseignement tiré de l'étude des silex de l'horizon moyen de Bou-Iniba, dont les grains de phosphate, protégés par la silice, sont beaucoup plus imprégnés d'hydrocarbures que les éléments non inclus dans les silex (p. 674-675).

Le groupe des débris de tissu osseux prend une part extrêmement variable à la constitution des dépôts, et il en va de même pour les coprolithes typiques. Une seule particularité est à signaler en ce qui touche les premiers, partiellement représentés par des fragments de forme générale prismatique, sans trace de microstructure caractéristique.

Hormis les restes de Vertébrés, les organismes ne fournissent aucune contribution à la formation du ciment. Les phosphates sont meubles et le plus souvent cohérents, à des degrés fort divers. Par simple juxtaposition des grains d'accolement à leurs points de contact, il se produit un minimum de cohérence. Règle générale, ne souffrant que des exceptions vraiment infimes, les phosphates doués d'une certaine cohérence, ou très résistants à l'écrasement, sont des phosphates à ciment de calcite plus ou moins largement cristallisée. Aux exceptions correspondent des types pourvus d'une gangue argileuse incomplète. Tout prouve que le ciment calcaire est originel. Qu'il s'agisse des amas qualifiés de calcaires, subordonnés aux diverses couches, quand elles affectent plus ou moins le facies sableux, ou des horizons de « calcaires phosphates » subordonnés à la formation, ils ont en commun une propriété très générale, à savoir la tendance à l'écartement des grains susceptibles de s'isoler à des degrés divers. En sorte que *l'état physique de ces phosphates a été fixé avec toutes ses modalités sur le fond de la mer.*

La participation des granules de quartz à la constitution de la gangue est des plus réduites.

N'était le problème, difficile à résoudre des transformations, qui ont fait du phosphate normal un phosphate argilo-ferrugineux, que le précédent résumé ne réclamerait aucun complément utile. Retenons, pour en faire état plus loin, que le complexe, servant de toit à la COUCHE I, comprend des horizons marno et argilo-phosphatés, c'est-à-dire non décalcifiés et imperméables.

D. PHOSPHATES DE LA RÉGION D'EL BOROUDJ.

L'état des anciennes recherches ne m'ayant pas permis de numéroter avec quelque certitude les horizons observés, je limiterai mon examen à quelques données essentielles.

Tous les phosphates prélevés sont caractérisés par des grains limpides, presque tous remarquablement riches en inclusions organiques. A la vérité, leur teneur en microplankton est comparable, dans la majorité des cas, à celle des phosphates du Sud tunisien. On y reconnaît des *Diatomées* très prépondérantes, parmi lesquelles il est facile d'identifier des *Triceratium* et des *Coscinodiscus*, de petits *Radiolaires* appartenant aux *Spumellaria* et *Nassellaria*, invariablement pourvus d'un test de grande finesse, et surtout une infinité de mêmes débris rappelant les fine-washings des vases à *Diatomées* actuelles. Notons encore l'existence de rares éléments englobant un seul et unique *Radiolaire* de taille normale, et des tronçons de spicules de *Spongiaires*, dont je n'ai observé au total que deux exemplaires.

Il s'y trouve également des éléments renfermant des inclusions minérales, se rapportant, par exception, à des rhomboédres de calcite. D'autres, parfois en nombre très appréciable, ont pour noyau un grain de quartz. Enfin, on observe, mais rarement, des matériaux, plus volumineux que les autres, englobant plusieurs grains de quartz. Dans tous les cas, le quartz inclus dans le phosphate et celui dont il va être question à l'état libre, réalisent rigoureusement le même type, au double point de vue taille et morphologie.

Toutes les sections renferment plusieurs coprolithes et des débris de tissu osseux en nombre variable, jamais très élevé à ma connaissance.

Les phosphates du district d'El Boroudj tirent leurs principales caractéristiques de la taille plus grosse des éléments phosphatés, de la fréquence du quartz et de la nature de la gangue. Les deux premiers traits sont de grand intérêt au point de vue paléogéographique. Des échantillons réservent une grande place à des grains de quartz anguleux et relativement volumineux (mm 16). Ceux que j'ai prélevés dans les vieux travaux d'Oued Meshoura sont riches en grains revêtus ou non d'une gaine phosphatée, de faible puissance en général.

Ces phosphates ne sont pas meubles, à proprement parler, mais doués d'une très faible cohérence. Pas un seul n'est pourvu d'un ciment calcaire s'étendant à toute la masse, et presque tous n'ont d'autre gangue qu'un peu de matière argileuse enrobant les grains, grâce à quoi ils sont maintenus en place. Par exception, cette matière comble tous les vides de plages d'étendue très limitée. Il s'agit d'une argile très béréfringente, douée des mêmes caractères que celle des phosphates argilo-ferrugineux de Kourigha dont il va être question. Un seul spécimen de mes collections, originaire de Kouddet Abou, possède une gangue de nature calcaire, tantôt, sous la forme de calcite largement cristallisée, emprisonnant une série d'éléments phosphates, tantôt, à l'état de petits rhomboédres parfaits et de grains subrhomboédriques.

Du point de vue génétique, il est utile de souligner l'intervention généralisée d'un ciment argileux, la multiplication très marquée du quartz détritique, en même temps que l'augmentation très sensible de la grosseur des éléments. Ces particularités signifient que le gisement d'El Boroudj a été engendré à une moindre distance du rivage que celui de Kourigha et que l'existence d'une terre émergée au Sud doit être envisagée. Il y a dans cette source un élément d'information d'importance pour l'étude du problème de la liaison originelle du groupe spetentrional, comprenant les gisements des Ouled-Abdoun et du Tadla avec celui des Ganntour.

Notons encore que l'introduction de nombreux matériaux détritiques dans les phosphates du district d'El Boroudj n'entraîne aucune répercussion, ni sur la constitution des grains, ni sur la nature et le degré de fréquence des inclusions organiques d'origine pélagique.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

Entre les phosphates du Bassin des Ouled-Abdoun et ceux de l'Est algérien ainsi que de Tunisie, il n'y a vraiment aucune différence fondamentale.

D'un côté comme de l'autre, les matériaux phosphatés qui ne procèdent pas des Vertébrés sont d'origine première pélagique, avec cette particularité que la principale contribution organique est fournie par le groupe des *Diatomées* marines. En compagnie de ces Algues, on retrouve les *Radiolaires* de taille normale, toujours présents mais réduit à un rôle effacé, en l'état actuel des choses, à l'exclusion pour ainsi dire complète des Foraminifères et des restes de Spongiaires

Et ici, comme là, les microorganismes qui prennent, en moyenne, une part considérable à la constitution des dépôts sont absolument exclus de la gangue et réservés aux grains.

Bref, la parenté des formations phosphatées s'affirme des plus étroites, et le problème génétique est indiscutablement le même de part et d'autre. Les conditions de milieu ne paraissent différer qu'au point de vue de l'ampleur des ruptures d'équilibre, beaucoup plus importantes en Tunisie et en Algérie que dans le grand Bassin des Ouled-Abdoun. Ces questions solliciteront derechef notre attention, lorsque l'analyse de tous les phosphates du Maroc aura été amenée à bonne fin.

TRANSFORMATIONS SUBIES PAR LES PHOSPHATES DU BASSIN DE KOURIGHA POSTÉRIEUREMENT A LEUR DÉPÔT.

La question des transformations subies par les phosphates, postérieurement à leur dépôt, s'est déjà posée au cours de notre étude après avoir analysé les phosphates de la craie blanche des Bassins de Paris et de Mons. Dans le cas présent, cette question soulève deux problèmes distincts, confondus en un seul par une interprétation sujette à révision :

1° *L'état physique originel des phosphates actuellement meubles.*

2° *Et l'interprétation des phosphates argilo-ferrugineux, subordonnés aux phosphates, exploités ou non dans une partie du Bassin de Kourigha.*

A la vérité, on peut les résoudre sans faire appel au microscope ce qui n'est pas une raison pour se priver des lumières fournies par l'étude micrographique des matériaux mis en cause.

1° ÉTAT PHYSIQUE ORIGINEL DES PHOSPHATES.

Les phosphates de Kourigha se distinguent de ceux qui ont été analysés précédemment par deux propriétés générales : l'état meuble d'une partie de la formation et la richesse exceptionnelle du produit, qui est la conséquence de son état physique. A vrai dire, le Bassin de Gafsa nous a déjà mis en présence de phosphates mal consolidés et friables, exploités au siège de *Redeyef*. Mais il s'agit là d'une exception, alors qu'à Kourigha l'exception est devenue la règle pour la Couche I.

L'anomalie réalisée par les phosphates pulvérulents de Kourigha comporte à première vue deux explications : A. *Ils ont été engendrés par décalcification aux dépens de phosphates cohérents.* B. *Ce sont des phosphates originellement meubles, qui n'ont jamais été consolidés.*

A. HYPOTHÈSE DE LA DÉCALCIFICATION. — A ma connaissance, la notion d'un état meuble acquis secondairement, très en faveur chez les exploitants, n'a jamais fait l'objet d'une démonstration. Contredite par une série de faits décisifs, elle n'est appuyée par aucune observation.

La couche I, dont il sera d'abord uniquement question, passe par de nombreux intermédiaires de l'état sableux généralisé à l'état cohérent non moins exclusif. On voit, par exemple, se développer à toute hauteur, des noyaux, des rognons, des blocs et des amas de phosphate solide,

d'une morphologie très variable, irrégulièrement et grossièrement ordonnés. On voit encore le calcaire phosphaté apparaître au mur, envahir graduellement ou brusquement le sable phosphaté dont la prise en masse peut être complète. Il arrive que du mur partent des sortes de colonnes irrégulières — piliers des mineurs — susceptibles d'atteindre le toit, à la façon des stalagmites ⁽¹⁾. De cette intervention capricieuse des calcaires phosphatés, il résulte, d'après P. Despujols, que « dans les Ouled Abdoun, le mur généralement phosphaté des couches est souvent irrégulier, la cavité qui résulterait de l'extraction des parties sableuses aurait la forme d'une grille au sol ondulé, soutenu par des piliers ou des massifs plus ou moins importants » ⁽²⁾. Il importe d'ajouter pour ne pas fausser la physionomie dominante de l'horizon que le Sable phosphaté peut exister seul, ou peu s'en faut, sur de grands espaces.

Dans la thèse de la décalcification les parties cohérentes, subordonnées à la couche I, ne sont pas autres chose que des témoins d'un état primitif, s'étendant à tout l'horizon. Passons en revue les objections.

a. Du point de vue théorique, si le sable phosphaté procède du « calcaire phosphaté » par décalcification, la couche doit subir une réduction de puissance d'autant plus grande que la décalcification est plus avancée — à moins que les grains phosphatés ne soient tous juxtaposés, et que le ciment se borne à combler les vides résultant de leur forme arrondie. En réalité, la contiguité des matériaux phosphatés est loin d'être la règle dans les calcaires, dits phosphatés, qui auraient échappé à la dissolution. La proportion de ces « calcaires », caractérisés par l'existence de grains libres dans le ciment est telle que la destruction totale de la gangue aurait entraîné un tassement des grains extrêmement appréciable et, partant, une réduction de volume très sensible. De fait, lorsqu'une couche tout entière à l'état de « calcaire phosphaté » est convertie latéralement en sable sur toute sa hauteur, — transformation qui peut être brusque — *l'épaisseur reste « ne varietur »*. A lui seul, cet argument condamne la conception de la genèse des sables par dissolution d'un ciment calcaire originel.

b. Tout phénomène de décalcification entraîne invariablement la mise en liberté d'impuretés de toutes sortes, y compris des produits ferrugineux, qui souillent le résidu de décalcification. A cet égard, l'étude de la décalcification des craies phosphatées campaniennes du Bassin de Paris, qui s'est effectuée à grande échelle, fournit un élément de comparaison très instructif (I, p. 216). Dans cet ordre d'idées, il n'est pas superflu de rappeler ici que la destruction par dissolution de la craie blanche de ce même Bassin, quoique de pureté exceptionnelle, libère une argile ferrugineuse de teinte brune, point de départ de la formation de *l'argile à silex*. Or, le passage des sables phosphatés de Kourigha au « calcaire phosphaté » se fait sans la moindre interposition d'impuretés, et, notamment, de matières argilo-ferrugineuses. Le fait est d'autant plus probant que si l'on décalcifie un morceau de « calcaire phosphaté » de Kourigha, on obtient toujours un résidu phosphaté très impur et fortement teinté, différent du sable phosphaté.

⁽¹⁾ On conserve dans le bureau de la mine de Bou-Lanouar une de ces colonnes, haute de 1 m. 90 et d'un diamètre de 0 m. 10 à 0 m. 20, qui s'étendait du mur au toit, au sein de sables phosphatés, tel un corps étranger parfaitement individualisé.

⁽²⁾ P. DESPUJOLS. — Les gisements de phosphate du Maroc. Les réserves mondiales en phosphates (*XIV^e Congr. géol. intern. Espagne*, 1926, vol. II, 1928, p. 601).

c. Un des meilleurs arguments qu'on puisse invoquer est fourni par l'examen des sables à la loupe binoculaire. Tous les grains de phosphate sans exception, sont faiblement incrustés de petites particules de calcite invisibles à l'œil nu, et très faciles à détacher. Cette calcite se présente à l'état d'éléments informes, de toutes petites plaquettes et de granules passant par tous les intermédiaires à de minuscules rhomboédres parfaits. Quelles qu'en soient la taille et la morphologie, ces matériaux ont un aspect cristallin très prononcé, et *tous sont exempts de la plus infime trace de corrosion et d'impuretés*. Bref ces sables, au moment de leur extraction, sont tant soit peu calcari-fères, et la poussière de calcite en question n'est pas autre chose qu'une petite amorce de gangue, tout au plus susceptible d'assurer une très légère adhérence aux éléments en contact.

d. La décalcification s'opérant *par descensum*, sans l'influence d'agents météoriques, la distribution des sables phosphatés, figurant les résidus, par rapports à la surface dans toute la formation phosphatée, doit obéir à une règle. De cette règle, il n'y a nulle trace.

Sur une même verticale, on peut observer :

La couche I, à l'état sableux et la couche II, toute entière sous forme de « calcaire phosphaté » ;

La couche I cohérente et la couche II meuble ;

Les couches I et II sableuses, séparées par un « calcaire phosphaté », qui sert de mur à la couche I et de toit à la couche II.

Au surplus, le complexe formant le toit géologique de la couche I comprend des bancs de « calcaires phosphatés » que la décalcification n'a point affectés, sans parler de la couche O, dont l'état physique varie, sans que ses modalités influencent celles de la couche I qu'elle surmonte.

Bref, *les états sableux et cohérents des couches O, I, II, III et IV se développent en toute indépendance, sans trahir la plus petite influence, s'exerçant par descensum.*

En outre, lorsqu'un phénomène de décalcification se propage de la surface vers la profondeur, il se manifeste invariablement dans les dépôts affectés, avec des intensités très inégales, en des points très voisins. Cette inégalité a pour conséquence la concentration en poches des résidus, comme cela s'est produit dans les craies phosphatées sénoniennes des Bassins de Paris et de Mons. Rien de pareil ne s'observe à Kourigha, où *les sables des différentes couches sont non seulement indépendants les uns des autres, mais ordonnés en horizons, d'épaisseur indépendante de l'état physique.*

e. La question acquiert une clarté toute particulière, lorsque les couches de phosphates sont séparées par des horizons imperméables. Rappelons à ce sujet que l'ensemble des dépôts surmontant immédiatement la couche I, au siège de Bou-Lanouar, comprend une marne phosphatée (E) et une argile phosphatée (H). Dans le cas des exploitations de Bou-Jniba, il existe entre les couches I et O, tout un complexe de construction variable, formant le faux-toit des mineurs, et comprenant les silex en tables continues, ainsi que des horizons marneux. La décalcification *per descensum* est impossible à travers un pareil ensemble — lequel n'a pas été décalcifié.

Il importe d'ajouter que l'état physique des horizons phosphatés est indépendant de la puissance des terrains qui les séparent de la surface. Comment concevoir la décalcification par des agents météoriques, lorsque la formation phosphatée enfouie sous le plateau, à une grande profondeur, est protégée par une grande épaisseur de dépôts variés, qui n'ont enregistré eux-mêmes aucune action dissolvante? Et pourquoi la décalcification ne s'exerce-t-elle pas à une

échelle particulièrement grande lorsque le manteau protecteur des phosphates est d'épaisseur très réduite ou nulle, comme dans la région d'Oued-Zem?

Que si l'émersion, tenue pour nécessaire, date de la fin même de ces grandes accumulations de phosphate, comme l'hypothèse en a été faite (L. Joleaud, L. Moret), pour expliquer la genèse des phosphates argilo-ferrugineux, les difficultés restent *ne varietur* en raison de la nature des sédiments qui surmontent la couche I.

f. L'analyse micrographique des dépôts verse au débat une donnée de grande portée. Lorsque les couches minces sont faites à cheval sur les parties cimentées et des plages qui ne le sont pas, on n'observe jamais la plus petite trace de corrosion à la jonction des deux phosphates. Il n'est pas superflue d'ajouter que l'argile ferrugineuse de décalcification en est absolument exclue, à la séparation des phosphates cimentés et de ceux qui sont totalement dépourvus de gangue.

g. Un dernier fait d'observation, à invoquer pour le moment, milite également contre la notion de décalcification. En cassant des blocs et amas de «calcaire phosphaté», subordonnés à des phosphates meubles, il n'est pas rare d'y trouver des *inclusions de sable phosphaté typique, isolées de toutes parts et invariablement privées de la plus petite trace de résidu de décalcification*, dont la présence ne saurait s'expliquer par le processus indiqué.

B. LES PHOSPHATES MEUBLES DE KOURIGHA N'ONT JAMAIS ÉTÉ CONSOLIDÉS. — Telle est la conclusion que je me crois fondé à formuler, sans la moindre réserve. En d'autres termes, *l'état meuble que revêtent, ou peuvent revêtir, à grande échelle, les phosphates du Bassin des Ouled Abdoun, ne résulte pas d'un phénomène de décalcification et tout prouve qu'il est originel.* Bref, *les phosphates pulvérulents exploités à Kourigha ne sont pas autre chose que des phosphates en grains qui n'ont pas été consolidés depuis leur dépôt.* Ce qui revient à dire qu'il y a défaut de calcification et non décalcification.

Abstraction faite des transformations dont il va être question, le problème de l'état physique originel des phosphates à l'étude est des plus simples. Nous sommes là en présence de dépôts, comparables à l'origine et, dans une certaine mesure, aux sables siliceux tertiaires du Bassin de Paris, en minime partie consolidés et convertis en grès.

En définitive, l'état meuble des phosphates de Kourigha n'implique aucune difficulté d'interprétation, et il n'est nullement exagéré de dire qu'il ne pose aucun problème génétique. Tout au contraire, la nature cohérente des dépôts soulève la question, toujours complexe, des facteurs de la consolidation, surtout quand elle se réclame du régime sous-marin.

Si telle est la vérité, il est légitime de conclure que *chaque couche à son histoire propre*, formule qu'il y aura lieu de serrer de près, dès que nous serons fixés autant qu'il se peut, sur les transformations subies par les phosphates après leur dépôt. Tout fait supposer qu'en même temps que s'accumulent les grains sur le fond de la mer, chaque couche reçoit en partage une certaine provision de carbonate de chaux, sous forme de vase, qui va assurer au phosphate son faciès définitif et particulier.

Trois manières d'être principales en dérivent :

1° Le carbonate de chaux manque ou peu s'en faut, et la couche est tout entière sableuse;

2° Il intervient à dose très variable, lorsque l'horizon est composé de sable et de «calcaire phosphaté», en n'importe quelle proportion;

3° Le sable est en totalité converti en phosphate calcaire si la provision de carbonate de chaux, incluse dans le phosphate en voie de dépôt, est telle que tous ses grains sont noyés dans une vase calcaire.

Nul doute que ces différences ne tiennent à une préparation mécanique, qui dose en quelque sorte la proportion de vase associée aux grains de phosphate.

Dans le cas, où il y a déficit de carbonate de chaux, celui-ci peut être redistribué dans la masse sableuse, et rassemblé par ségrégation pour constituer les concentrations calcaires. Il y a tout lieu de penser que ce déplacement de carbonate de chaux relève des phénomènes sous-marins. Dans l'hypothèse, où la consolidation serait postérieure au dépôt de toute la formation, et consécutive à l'introduction dans le milieu de solutions carbonatées, la répartition sur une verticale donnée des phosphates consolidés et des parties meubles ne serait pas du tout ce qu'elle est.

On peut dire, en manière de conclusion que *chaque couche, dès qu'elle a cessé de se déposer, porte en elle-même tous les éléments de sa constitution définitive, au moins en ce qui touche le phosphate et le carbonate de chaux; et pour celui-ci, il y a, ou il peut y avoir migration, en cas d'insuffisance, pour remplir tous les vides résultant de la juxtaposition imparfaite des grains.*

Explication de la richesse et de la pureté des phosphates exploités à Kourigha. — Du point de vue pratique, l'étude à laquelle il vient d'être procédé nous explique, à la fois la richesse et la pureté, toutes deux exceptionnelles, des phosphates exploités à Kourigha.

La richesse est la conséquence de la contiguité des grains, et en même temps de l'absence de gangue. Quant à la pureté, elle résulte, avant tout, de ce que les phosphates n'ont jamais été consolidés et dans une faible mesure, de la rareté et surtout de l'absence dans les grains, de micro-organismes à des états de composition, susceptibles d'introduire une foule d'impuretés dans les éléments.

A ce sujet, rappelons que notre analyse nous a mis en présence de deux sortes de sables phosphatés : les uns issus d'anciens phosphates cohérents décalcifiés, et les autres qui n'ont jamais été consolidés. Les premiers sont tous souillés par la concentration des impuretés d'une ancienne gangue calcaire, plus ou moins pure (exemple : sables dérivant de la décalcification d'anciennes craies phosphatées sénoniennes du Bassin de Paris et de la Belgique). Les seconds bénéficient d'une pureté idéale, parce qu'ils ont toujours été privés de gangue.

La différence entre les deux types est tellement tranchée qu'on peut toujours conclure à priori, qu'un sable phosphaté pur n'a jamais été consolidé.

2° INTERPRÉTATION DES PHOSPHATES ARGILO-FERRUGINEUX.

A première vue, la thèse de la décalcification trouve un sérieux point d'appui dans l'existence de phosphates argilo-ferrugineux, principalement au sommet des couches I et II. Autant le problème de l'état physique originel des phosphates est facile à résoudre, autant l'interprétation de ces phosphates est malaisée.

A la suite de l'étude qu'il leur a consacrée, en 1923, L. Joleaud a assigné à ces produits une *origine latéritique*, solution impliquant l'émergence de la formation phosphatée avant le dépôt des calcaires à silex⁽¹⁾. De mes voyages au Maroc, j'ai rapporté l'impression que l'opinion de L. Joleaud régnait sans partage chez les exploitants. Elle était, notamment, celle d'A. Beaugé⁽²⁾ qui, tout en se prononçant pour l'absence de discontinuité importante de sédimentation, tenait pour indéniable les phénomènes d'émergence signalés par L. Joleaud. Plusieurs des géologues de grand mérite, qui ont dégagé les grandes lignes de la géologie du Maroc, se sont prononcés dans le même sens. En particulier, L. Moret⁽³⁾, dans ses recherches sur l'Atlas de Marrakech, y note que la phosphatisation dans le Bassin des Ouled Abdoun est interrompue par une lacune, marquée par la présence d'argiles latéritiques rouges.

De l'explication, plausible à première vue, que L. Joleaud a donnée de la genèse des phosphates argilo-ferrugineux, retenons que ces phosphates seraient le produit d'une altération de la partie superficielle de la zone exploitée, laquelle «aurait été longtemps exposée à l'air, sous un climat rappelant celui qui règne aujourd'hui dans la zone tropicale». Et c'est au cours de cet épisode que la matière argileuse se serait infiltrée dans le phosphate. La transformation progressant de haut en bas expliquerait pourquoi la base de la zone modifiée est fort irrégulière, et caractérisée par «des quantités de filonnets de pénétration dans la masse sous-jacente». Restait à trouver dans l'allure des dépôts des témoignages que l'on pût interpréter en faveur de cette orientation. L. Joleaud a relevé des indices de ravinement au toit de la couche I, et conclu à l'existence d'une émergence⁽⁴⁾.

Après avoir étudié ce problème sur place, à deux reprises, je ne me flatte pas d'en proposer une solution complète, et satisfaisante en tous points. Sur ce sujet, j'ai réuni nombre de faits nouveaux, relatifs, les uns, aux manières d'être des phosphates argilo-ferrugineux, observés dans les exploitations et les affleurements, et, les autres, à la constitution même de ces phosphates, analysés au microscope. L'interprétation, appelée à prévaloir tôt ou tard, devra rendre compte des uns et des autres.

Manières d'être des phosphates argilo-ferrugineux. — Le carreau de la mine de Bou-Jniba et l'étude des couches I et II de la division de Bou-Lanouar sont la source de presque toutes les observations mises en valeur dans les pages suivantes. Au contact même de la table de silex du toit, on peut voir la couche I revêtir un faciès aberrant, sous la forme d'un phosphate d'aspect ferrugineux, et changer de consistance, comme si le dépôt était imprégné d'argile ferrugineuse.

Lors de son extraction la matière est quelque peu plastique, et se laisse entamer par le pic, à la façon d'un dépôt argileux. A l'état sec, le produit revêt un aspect de brique de plusieurs nuances. C'est alors une roche cohérente qui montre, à la loupe, des grains de phosphate se

⁽¹⁾ L. JOLEAUD. — Les phosphates du Maroc. I. Stratigraphie et pétrographie de la région des Ouled-Abdoun (Maroc central) [B. S. G. Fr., 4^e série, t. XXIII, 1923, p. 172-184, pl. VIII].

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — Maroc. Première partie. Historique, Géologie, Organisation générale de l'Exploitation (*Publications du Bureau d'Études géologiques et minières coloniales*. Les ressources minérales de la France d'outre-mer. IV. Le Phosphate, 1935, p. 31).

⁽³⁾ L. MORET. — Recherches géologiques dans l'Atlas de Marrakech (Direction générale des Travaux publics. Service des Mines et de la Carte géologique. *Notes et Mémoires*, 1935, p. 170).

⁽⁴⁾ L. JOLEAUD. — *Op. cit.*, p. 174.

détachant en gris blanc, d'un fond teinté en rouille claire ou jaunâtre, d'aspect amorphe et terreux. Dans certains échantillons on y observe des nids de granules translucides d'aspect saccharoïde. Au premier coup d'œil, on constate que le degré de fréquence des éléments phosphatés est très sensiblement moindre que dans les phosphates exploités et que la gangue argilo-ferrugineuse s'est développée à leur détriment. La transformation subie a donc pour effet d'espacer les grains.

La modification en question se poursuit à partir du toit sur 10, 20, 30 centimètres et parfois davantage (fig. 65 et 65a). Elle prend fin en profondeur, soit brusquement, soit le plus souvent par des sortes de digitations, à section transversale plus ou moins circulaire, simples, bifurquées ou irrégulièrement anastomosées. L'image qui résulte du groupement de ces digitations évoque l'idée d'une intervention organique, d'ailleurs impossible à démontrer, mais que je tiens pour extrêmement probable. Suivie dans les galeries de roulage de Bou-Lanouar, où elle est accessible sur une très grande longueur, on constate que la zone ainsi transformée est soumise à d'incessantes variations d'épaisseur, et susceptible de s'interrompre pour reparaître plus loin, voire même de s'amplifier accidentellement, au point d'intéresser la couche entière, en donnant naissance à ce qu'on a appelé improprement des *piliers argileux*. On désigne ainsi de petites roches de phosphate argilo-ferrugineux, en forme d'entonnoirs étroits, orientés verticalement, s'arrêtant à toute hauteur dans les couches I et II, et susceptibles de les traverser dans toute leur épaisseur.

Le schéma ci-contre (fig. 64), résultant d'observations relevées en 1928 et vérifiées en 1936, rend bien compte de l'allure d'ensemble du phosphate argilo-ferrugineux. Il est de nature à faire supposer que ce phosphate résulte d'une modification du type normal, sous des influences s'exerçant de haut en bas.

A la recette 1 de Bou-Lanouar, notamment, on peut relever une observation qui suffit, à elle seule, pour éliminer toute idée d'intervention venant de la surface actuelle du sol, et gagnant de proche en proche la profondeur. Les couches I et II sont l'une et l'autre modifiées à leur partie terminale, et dans les mêmes conditions. Si cette métamorphose était la conséquence d'un phénomène général agissant sur la totalité de la formation phosphatée, ou après le dépôt de la couche I (hypothèse L. Joleaud), un lien très étroit devrait exister entre les modifications subies par les deux horizons. Or ce lien n'existe pas. A telle enseigne que les phosphates argilo-ferrugineux de la couche I sont indépendants de ceux de la couche II. De plus, ces modifications peuvent faire défaut dans la couche I, alors qu'à l'aplomb, la couche II est transformée à sa partie terminale. Ajoutons que la couche I, plus élevée dans la série que la couche II, n'est ni plus ni moins modifiée, en moyenne, que celle-ci. Quant aux « piliers argileux », qui sont très clairsemés, ils existent dans les deux horizons, mais en toute indépendance. Pareille indépendance semble exister dans le développement des phosphates argilo-ferrugineux des couches O et I. A ma connaissance, on n'a observé nulle part une transformation généralisée de tous les horizons phosphatés, sur une même verticale. Et, point capital, quelle que soit l'épaisseur de la zone affectée, la puissance totale de la couche ne s'en trouve nullement modifiée. Ce qui veut dire, à n'en pas douter, que le phosphate transformé est remplacé par une égale épaisseur de phosphate argilo-ferrugineux, circonstance qui suffit, à elle seule, pour écarter la thèse en question.

Il importe, en outre, d'ajouter que dans les affleurements étudiés à Oued-Zem, le phosphate

argilo-ferrugineux fait défaut, et qu'il manque, ou peu s'en faut, dans les multiples tranchées de chemins de fer, recoupant la formation phosphatée.

En analysant aussi minutieusement que possible les changements subis par les horizons successifs, dans des conditions d'observation qui ne sauraient être plus favorables, on arrive, une fois encore, à la conclusion que *chaque couche doit avoir son histoire propre*. En conséquence, la thèse de L. Joleaud impliquerait des émerSIONS répétées, la récurrence des actions continentales qui en dérivent, et, partant, la multiplication des horizons latéritiques. Or, je crois pouvoir affirmer, sans risque d'erreur, qu'au double point de vue stratigraphique et pétrographique, le gisement de Kourigha ne fournit pas un seul argument à retenir à l'appui de cette notion. Certes, la formation phosphatée a enregistré des ruptures d'équilibre qui, toutes, ont le caractère de *perturbations sous-marines*. De ce régime relèvent la formation de surfaces bosselées à plusieurs niveaux dans la coupe d'Oued-Zem, la suppression accidentelle du mur de la couche I, le ravinement des argiles et marnes au mur de la couche O, à Bou-Jniba, etc., toutes modifications synonymes d'affouillements sous-marins. Aucune de ces ruptures d'équilibre n'est en rapport direct avec la genèse des phosphates argilo-ferrugineux, et le seul enseignement qu'on en puisse tirer, en vue de la solution cherchée, c'est qu'elles trahissent un régime très instable.

Quelle que soit l'origine du phosphate argilo-ferrugineux, on conçoit qu'il ait fourni à la thèse de la décalcification un point d'appui, apparemment très solide. La vérité est qu'il existe des phosphates meubles, en l'absence des phosphates argilo-ferrugineux, et que la présence de ceux-ci n'entraîne pas nécessairement celle des phosphates pulvérulents dans la couche considérée. En réalité, *la genèse des phosphates meubles et celle des phosphates argilo-ferrugineux sont deux phénomènes foncièrement distincts, conditionnés par des milieux différents*. C'est au moins la solution à laquelle je me suis arrêté, sous la pression d'arguments tenus pour décisifs.

ORIGINES DES PHOSPHATES ARGILO-FERRUGINEUX.

Avant d'aborder la seconde partie du problème à résoudre, il y a lieu de nous demander si, en l'espèce, on peut parler d'origine latéritique sans abus de langage. Il va de soi qu'il ne peut être question de latérites typiques. Si nous consultons les études classiques consacrées par A. Lacroix⁽¹⁾ aux latérites de Guinée et de Madagascar, nous apprenons que la roche-mère des latérites proprement dites est une roche éruptive ou cristallophyllienne, disons une *roche silicatée*. Il s'ensuit que la formation des phosphates argilo-ferrugineux est un sujet en tous points étranger au problème des latérites typiques, réserve faite pour l'émerSION invoquée — si émerSION il y a. Point important, il s'en faut que toutes les « terres rouges » soient apparentées aux latérites proprement dites. Il en est parmi elles qui procèdent d'un phénomène de décalcification et d'oxydation, étroitement lié à l'existence d'un régime continental, mais on en connaît qui représentent des *sédiments originellement rouges*. Tel est le cas pour les « boues rouges » des océans actuels.

CONSTITUTION DES PHOSPHATES ARGILO-FERRUGINEUX DES COUCHES I ET II. (Pl. XXXVIII, fig. 118 et 119; Pl. XXXIX, fig. 120). — Il ne suffit pas de démontrer par l'observation du gisement que

⁽¹⁾ A. LACROIX. — Les latérites de la Guinée et les produits d'altération qui leur sont associés (*Nouv. Arch. Muséum*, t. X, 1913, p. 255-356, pl. X-XVII).

Ibid. — Minéralogie de Madagascar, t. III, 1923, p. 91-143, pl. V et VI.

chaque couche est indépendante des autres dans le développement de son facies aberrant, à l'état de phosphate argilo-ferrugineux, pour que soit posé dans toute sa complexité le problème de l'origine de ce facies. C'est ce que fait ressortir l'examen des coupes minces, lequel nous met en présence d'une donnée nouvelle d'importance fondamentale.

Dans les nombreux échantillons de phosphate argilo-ferrugineux analysés, les grains de phosphate sont isolés, et il arrive qu'ils le soient très largement (fig. 118 et 119). Dans quelle mesure cette constitution est-elle conciliable avec celle des roches-mères des phosphates argilo-ferrugineux, si le point de départ de la genèse de ces derniers est un phénomène latéritique? Deux cas sont à considérer :

1° *La roche-mère est un « calcaire phosphaté ».* — L'intervention des agents météoriques libère les grains de phosphate, et entraîne un tassement tel que tous sont finalement juxtaposés, comme ils le sont dans les sables phosphatés résultant de la décalcification des craies phosphatées du Nord de la France et de la Belgique (I, p. 216). Or, les grains des phosphates argilo-ferrugineux sont non moins espacés — et ils le sont parfois beaucoup plus — que dans les phosphates à gangue calcaire, délaissés par l'exploitation;

2° *La roche-mère est un sable phosphaté.* — Tel est certainement le cas pour les phosphates argilo-ferrugineux des couches I et II des mines de Bou-Lanouar et de Bou-Jniba. Cette fois, le point de départ est un phosphate dont les grains sont juxtaposés, sans interposition de gangue. S'il en est ainsi, on ne conçoit pas du tout que l'action des phénomènes latéritiques puisse séparer les grains, les espacer parfois très largement, et transformer le sable pur en phosphate argilo-ferrugineux, d'une épaisseur rigoureusement égale à celle de la roche modifiée.

De toute évidence, la constitution des phosphates argilo-ferrugineux est absolument incompatible avec le mécanisme invoqué par L. Joleaud, pour expliquer la transformation du phosphate normal en phosphate de type très aberrant. La composition même du minerai modifié ne l'est pas moins.

Composition chimique. — Un échantillon ⁽¹⁾ de la galerie Radia de Bou-Lanouar, prélevé dans le couronnement argilo-ferrugineux de la couche II, au contact du phosphate normal présente la composition suivante :

SiO ²	14,70 p. 100
Al ² O ³	3,50 —
Fe ² O ³	4,60 —
CaO.....	38,50 —
MgO.....	1,87 —
P ² O ⁵	22,36 —
K ² O.....	0,43 —
Na ² O.....	0,08 —
Fl.....	1,71 —
Cl.....	" —
CO ²	4,00 —
K ² O.....	8,05 —
SO ³	0,71 —
	97,51 p. 100
Phosphate de chaux.....	42,812 p. 100

⁽¹⁾ Le fragment analysé réservait une faible place à la gangue.

On ne manquera pas d'observer la teneur exceptionnellement élevée en silice, comparée à celle du phosphate normal (p. 693), l'enrichissement en magnésie et la présence d'une quantité des plus appréciables de carbonate de chaux qu'on ne s'attend pas à trouver dans un produit d'altération.

Composition minéralogique de la gangue. — Il est clair que le principal intérêt des matériaux analysés réside dans la gangue, laquelle est argileuse sans jamais l'être complètement. Règle générale, elle résulte de l'association, en proportions variables, de deux éléments essentiels : *matière argileuse et quartz clastique*. Une troisième substance, le *carbonate de chaux* y figure le plus souvent en quantité très faible (fig. 118), et par exception, en tant qu'élément revêtant une grande fréquence (fig. 119 et 120).

Dans les sections minces, cette gangue est redevable d'une coloration jaune brunâtre à un pigment réalisant deux façons d'être différentes : l'une assure à la matière une coloration très uniforme, qu'on ne peut résoudre en éléments constituants, comme si elle faisait partie intégrante de la substance du ciment; l'autre se présente sous la forme d'une infinité de petites granulations ferrugineuses. En lumière réfléchie, la gangue ressort avec une couleur ocreuse passablement foncée. Il arrive que le composé ferrugineux se concentre en petits amas, de couleur rouge en lumière réfléchie, se rapportant au sesquioxyde de fer. Entre les nicols croisés, la matière argileuse réalise tous les caractères d'une phyllite, polarisant dans les tons, jaune, orange, rouge, du premier ordre. Pierre Urbain, qui a bien voulu se charger de caractériser le minéral constituant, au moyen des rayons X, le rapporte à la *sépiolite*, c'est-à-dire à une argile magnésienne.

Au microscope, le produit se signale généralement par une très importante multiplication des grains de quartz, par rapport au phosphate non modifié, si bien que les sections, mesurant tout au plus 1 cm² 5 de surface, en peuvent contenir plusieurs centaines. D'une façon générale, le minéral est représenté par des éléments anguleux, de dimensions variables, mais comparables dans une plage donnée. Par tous ses caractères, ce minéral trahit une origine clastique indiscutable.

Le *carbonate de chaux*, qui fait cortège à la matière argileuse et au quartz, est un élément de première importance, du point de vue théorique. De l'analyse d'un grand nombre d'échantillons, il résulte que tous réagissent plus ou moins à l'action des acides faibles. Des préparations qu'on en tire, il en est qui ne montrent pas un seul granule de calcite, soit par suite de la rareté du minéral, soit en raison de sa distribution irrégulière. D'autres en renferment des dizaines ou des centaines. Le phosphate argileux de la couche II de la galerie Radia de Bou-Jniba s'est révélé le plus calcaire de tous. On peut les observer, soit répartis uniformément, soit groupés dans une plage (pl. 119, fig. c), voire rassemblés en traînées comme des matériaux clastiques soumis à une préparation mécanique. Le minéral constitue des grains irréguliers, parfois globuleux, des éléments subrhomboédriques, et rarement des cristaux parfaits, les uns et les autres engagés dans la matière argileuse et en l'absence absolue de toute trace de corrosion. Est-il besoin d'ajouter que leur présence et surtout la morphologie des éléments ne se conçoivent pas dans un milieu profondément modifié par des influences météoriques ? A la vérité, rien ne trahit l'intervention de celles-ci.

Au surplus, l'élaboration d'un produit d'altération magnésien aux dépens, soit d'un phosphate meuble et conséquemment presque dépourvu de carbonate de chaux, soit d'un phosphate cohé-

rent, et par suite très chargé de calcaire, défie toute explication au point de vue chimique. Dans les deux cas, il est nécessaire de faire de l'argile magnésienne un élément étranger au phosphate, ajouté à celui-ci par voie sédimentaire, lors de la formation du phosphate argilo-ferrugineux.

Enfin, on peut encore tirer argument de l'existence dans l'argile de la gangue de nombreuses petites particules minérales non représentées dans les phosphates à gangue calcaire.

CONCLUSION.

Des faits mis en évidence et qu'il est aisé de contrôler, il résulte que *tout en gardant son épaisseur, le phosphate sableux modifie profondément sa composition par l'addition de matière argileuse, d'oxyde de fer, de quartz et de carbonate de chaux*. De ce chef, il est démontré que la conception latéritique se heurte à toute une série d'impossibilités qui la condamnent sans appel.

Origine sédimentaire du phosphate argilo-ferrugineux. — Aux données précédentes s'en ajoutent d'autres, de nature différente, dont il convient de faire état en toute explication.

L'examen prolongé et répété des gisements suggère l'idée que le phosphate argilo-ferrugineux, loin d'être un produit d'origine continentale, doit être classé parmi les sédiments proprement dits. Son caractère sédimentaire se révèle souvent à l'œil nu par des indices très nets de stratification horizontale et par une texture feuilletée parfois très apparente, trahissant l'existence d'un dépôt accumulé dans l'eau, sous l'influence de la pesanteur.

D'autre part, il est amplement démontré que la sédimentation argileuse n'est pas restée étrangère à la constitution des gisements. Ne savons-nous pas par les données rassemblées au début de cette étude, que la matière argileuse peut participer, et parfois dans une très large mesure, à la formation des stériles étroitement associés aux phosphates ? Dans le district d'El-Boroudj (Kef Abbou), les six couches de phosphates définies alternent avec des marnes (p. 668). Un autre exemple instructif est fourni par la descenderie de la Maison rouge (p. 675), qui a reconnu l'existence d'un horizon de phosphate argileux, passant de 12 centimètres, nettement interstratifié dans la couche I. Il s'ensuit que le dépôt des phosphates a pu être troublé par des apports argileux de nature franchement sédimentaire.

A lui seul, le microscope fournit un argument de poids à opposer à la thèse latéritique. Il arrive que les calcaires phosphatés des couches I et II, et même les calcaires du mur de la couche II, renferment de tout petits îlots de phosphate argilo-ferrugineux, isolés de toutes parts en pleine roche normale (fig. 110). Nul passage ne s'observe entre les deux parties en présence, et à leur contact le ciment de calcite ne trahit pas la moindre trace de corrosion. Il est d'ailleurs inconcevable que de pareils îlots puissent procéder de calcaires phosphatés par décalcification, sans que le phénomène entraîne une grande réduction de volume du produit dérivé. Et de surcroît, d'où pourrait venir la matière argileuse dans un pareil milieu ? En d'autres cas, on constate qu'un espace exigü entre plusieurs grains phosphatés est occupé par de l'argile ferrugineuse, alors qu'au pourtour des îlots argileux la gangue est constituée par de la calcite intacte. De toute évidence, l'hypothèse d'une élaboration *in situ* de ces inclusions aux dépens d'un calcaire phosphaté se heurte à d'insurmontables difficultés. Le phénomène peut d'ailleurs être généralisé et donner naissance à des phosphates à gangue, exclusivement argileux comme il en existe dans

le district d'El-Boroudj, ou argilo-calcaire (soit de la formation phosphatée de Kourigha). Tout fait supposer que l'origine de cette matière doit être cherchée dans un phénomène de préparation mécanique. C'est ce que tend à démontrer l'expérience suivante.

Vient-on à décalcifier les phosphates calcarifères, subordonnés aux couches I et II, qu'on obtient un résidu renfermant tout autre chose que le produit argileux dont l'origine est en cause. C'est donc un fait acquis, en toute hypothèse, que cette matière ne dérive pas des horizons phosphatés soumis à l'action d'agents météoriques. En conséquence, elle a été introduite dans les phosphates argilo-ferrugineux, au même titre que les éléments phosphatés et les grains de quartz détritique. Et point important, cette matière est absolument identique à celle des marnes et argiles, comprises entre les couches I et O des sièges de Bou-Lanouar et de Bou-Jniba (p. 673). Or ces marnes et argiles, constituent des horizons sédimentaires parfaitement définis, dont l'origine marine ne saurait prêter à la moindre discussion.

Ces multiples données nous acheminent peu à peu vers la conclusion que le *phosphate argilo-ferrugineux qui couronne les couches II et I, en dépit de son facies aberrant et de son allure générale, n'est qu'une modalité du phosphate normal, développée sous l'empire de modifications dans l'apport sédimentaire, auxquelles, il faut ajouter, croyons-nous, des interventions organiques.*

Signification de la surface irrégulière séparant le phosphate normal et le phosphate argilo-ferrugineux. — La séparation du phosphate normal et du phosphate argilo-ferrugineux des couches I et II, que nous savons très irrégulière, ondulée et fort accidentée dans le détail (fig. 62 p. 669), revêt un double caractère. C'est avant tout la trace d'une surface de ravinement, d'origine sous-marine, que ne souligne aucun élément grossier, car à la jonction des deux variétés de phosphate on n'observe, ni brèche, ni poudrigne. C'est là que se place la rupture d'équilibre qui a mis fin au dépôt du phosphate normal, et non au toit de la couche, phosphate argilo-ferrugineux compris.

Quant aux accidents de détail, en forme d'innombrables digitations, pénétrant dans le phosphate typique, ils évoquent, comme je l'ai déjà dit (p. 707), l'idée d'une intervention organique. A la vérité, ces digitations rappellent à s'y méprendre, celles de la base de la craie à Bélemnites du Bassin de Paris, pénétrant dans la craie blanche du mur à *Micraster cor anguinum*. Ces prolongements de la craie grise phosphatée dans la craie blanche sous-jacente ont été attribués à des Éponges cornées, mais sans preuve décisive. Ils témoignent également d'une parenté très frappante avec les boudins phosphatés, tant de fois signalés dans les formations phosphatées de Tunisie, d'Algérie et du Maroc, lorsqu'ils cessent d'être enchevêtrés les uns dans les autres, à la différence près qu'ils sont de taille plus petite. On n'a pas oublié que ces boudins sont toujours associés d'étroite façon aux ruptures d'équilibre qui ont affecté les formations phosphatées.

Disons, pour conclure, que l'origine organique des digitations, à la séparation des deux variétés de phosphate, est infiniment probable; malheureusement, elle n'est que cela. Ajoutons que ce qui est vrai pour la couche I ne l'est pas moins pour la couche II, dont la transformation se réclame du même enchaînement de phénomènes.

Difficultés soulevées par la constitution des silex subordonnés au phosphate argilo-ferrugineux (Pl. XXXIX, fig. 121). — Arrivé à ce point de mon étude, j'ai eu l'illusion de toucher au but, avec une solution paraissant répondre à toutes les exigences du problème posé. Ma satisfaction fût restée sans mélange, si je n'avais eu l'idée d'interroger les silex inclus dans le phosphate normal et dans le phosphate modifié de la couche I.

La description du gisement de Kourigha nous a appris que la couche I est caractérisée par trois horizons de silex, le supérieur, en table, continue ou non, localisée à la partie terminale du phosphate, à quelques centimètres du toit, et les deux autres, en rognons, alignés parallèlement à la stratification (p. 673). *Que ladite couche soit sableuse, cohérente ou convertie en phosphate argilo-ferrugineux, rien n'est changé dans la position et l'ordonnance des silex.* En des points voisins du phosphate sableux et du phosphate consolidé, les silex sont rigoureusement sur le même plan, donnée que j'aurais pu invoquer avec les autres en faveur de l'état meuble original. De surcroît, les silex inclus dans un « pilier argileux » et ceux qui gisent dans le phosphate qui s'étend de part et d'autre, s'alignent, comme si le milieu était parfaitement homogène. En toute hypothèse, c'est là un fait quelque peu mystérieux, mais ce n'est pas le seul qui fasse obstacle à notre interprétation.

La question se complique, en effet, d'une identité de facies des silex inclus dans le phosphate normal et dans le phosphate modifié, du fait que les silex des phosphates sableux et cohérents, d'une part, et ceux des phosphates argilo-ferrugineux, d'autre part, ne diffèrent nullement au microscope (comparer les fig. 117 et 121). En d'autres termes, *les silex des phosphates argilo-ferrugineux ne renferment pas la plus petite trace de matière argileuse, et tout se passe comme si les uns et les autres avaient été engendrés dans un seul et même milieu.* Observons à ce sujet qu'une donnée d'importance capitale domine toutes les conjectures envisagées, à savoir que *lesdits silex, qu'ils soient inclus dans le phosphate normal ou dans le phosphate argilo-ferrugineux, n'ont pu se former que par une substitution de la silice au carbonate de chaux.*

Les silex en question ont-ils pris naissance sur le fond de la mer, ou sont-ils de formation tardive, il est impossible de donner des faits précédents une explication satisfaisante en tous points. Dans la première hypothèse, on ne conçoit pas comment la table de silex, couronnant la couche I, est restée intacte pendant l'affouillement qui a préludé à la genèse des phosphates argilo-ferrugineux. Et dans la seconde, il est inconcevable que les silex développés dans le phosphate argilo-ferrugineux réalisent les mêmes caractères que les autres, et s'ordonnent dans le prolongement de ceux qui appartiennent en propre aux sables et calcaires phosphatés. Ne perdons pas de vue que les difficultés d'interprétation ne seraient pas moindres, si la conception de l'émergence et de l'altération latéritique était appelée à prévaloir, ce que je ne crois pas du tout.

Tout bien pesé, l'absence de toute trace de matière argileuse dans les silex des phosphates argilo-ferrugineux ne constitue pas, à elle seule, une objection décisive contre la seconde hypothèse. Dans ma thèse de doctorat (1897), j'ai longuement étudié l'élimination de la matière argileuse des concentrations d'opale globulaire, et surtout de calcédonite, dans le groupe des gaizes, plus ou moins argileuses, et montré que, dans les cherts de ces roches, il est impossible d'identifier un seul témoin de matière argileuse. Il se peut donc que des silex se soient développés en milieu plus ou moins argilo-calcaire sans garder la plus petite trace d'argile ⁽¹⁾.

RÉSUMÉ. — 1° Les phénomènes, qui ont transformé la couche I, sont sujets à récurrence, et non des phénomènes affectant, à un moment donné, tout le complexe phosphaté. Leur explication doit être cherchée en dehors d'influences continentales et d'actions latéritiques, incompatibles

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des roches sédimentaires (*Mém. Soc. géol. Nord*, t. IV, 2, 1897, p. 66-67).

avec les caractères stratigraphiques de la formation phosphatée et la constitution des phosphates argilo-ferrugineux.

2° Les phosphates de caractère aberrant, qui couronnent les couches II et I, résultent d'une sédimentation troublée par des apports argilo-calcaires et quartzeux.

3° Cette sédimentation a été inaugurée pour les deux couches II et I par une rupture d'équilibre, enregistrée sous forme d'une ligne de ravinement, à la séparation des phosphates non modifiés et des phosphates argilo-ferrugineux, et qui ne paraît pas s'étendre à tout le bassin.

4° Contrairement à l'interprétation de L. Joleaud, la succession des dépôts ne trahit pas la moindre trace d'émersion.

5° L'histoire des silex de la couche I pose des questions génétiques qui sont loin d'être clairement élucidées.

Tels sont les principaux résultats d'une enquête qui s'est révélée laborieuse, en raison de la difficulté du sujet. Il ne m'échappe pas que les témoignages contradictoires, relatifs aux silex, soulignent l'incertitude de mon information sur un point essentiel.

II. — BASSIN DES GANNTOUR. ⁽¹⁾

Du Bassin des Ganntour, compris entre les vieux massifs des Rehamma, au Nord, et des Djebilet, au Sud, on ne connaît que les bords nord et ouest, tout le reste de la formation étant caché par des dépôts éocènes et quaternaires. D'après A. Beaugé, le phosphate s'étend le long du bord méridional des Rehamma, c'est-à-dire de l'Ouest à l'Est, sur une longueur de 110 kilomètres, avec une pente vers l'intérieur de la cuvette, toujours faible, quoique plus prononcée que dans le Bassin des Ouled-Abdoun. Non loin de la terminaison orientale, le Bassin n'est éloigné que de quelques kilomètres de celui des Ouled-Abdoun (El Boroudj) ⁽²⁾.

Les données réunies sur ce domaine sont beaucoup moins nombreuses que pour le précédent. De celles qu'a publiées A. Beaugé, il résulte que la formation se développe certainement sous les morts-terrains, au Nord des Djebilet, où elle est interrompue par des pointements paléozoïques.

Ici, comme au Nord, le complexe phosphaté comporte de multiples horizons, de valeur différente, dont le supérieur, seul exploité, forme la couche numérotée I.

Au Maïas, à l'Est, A. Beaugé signale quatre couches, réparties sur une épaisseur de 22 m. 20, et titrant respectivement :

I.	Épaisseur 1 m. 25.....	70 p. 100 de phosphate de chaux.
II.	— 2 m. 40.....	63,05 p. 100 —
III.	— 1 m. 15.....	60,40 — —
IV.	— 1 m. 10.....	70 p. 100 —
	3 m. 90	

⁽¹⁾ Au Bassin des Ganntour, dont la mise en exploitation est postérieure à ma mission de 1928, j'ai consacré une seule exploration. Comme à Kourigha, j'ai trouvé, auprès de M. Duboin, Directeur et de ses ingénieurs, le concours le plus empressé et le plus efficace.

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 35 et pl. II.

A l'extrémité orientale du gisement, à Si Mohamed Ab El-Kader, on a dénombré 6 couches :

I.	Épaisseur	1 m. 15.....	65,15	p. 100	de phosphate de chaux.
II.	—	2 m. 05.....	63,70	—	—
III.	—	1 m. 95.....	65,14	—	—
IV.	—	1 m. 10.....	65,28	—	—
V.	—	1 m. 25.....	73,23	—	—
VI.	—	0 m. 55.....	73,50	—	—

A. Beaugé conclut de son exposé « que le gisement des Ganntour ne titre qu'exceptionnellement au-dessus de 70 p. 100, mais que c'est certainement le plus gros gisement connu du monde en 70 p. 100 »⁽¹⁾.

Les données précédentes, numériquement insuffisantes pour en tirer une conclusion générale, démontrent que les teneurs en phosphate varient irrégulièrement de bas en haut et d'une section à l'autre. C'est ainsi que dans une coupe, non reproduite ici (Bir-Chedda, à l'Ouest du Bassin)⁽²⁾, la couche II correspond au maximum (70 p. 100), alors qu'elle représente le minimum (63,05 et 63,70) dans les deux coupes détaillées plus haut. Et, point à noter, la couche la plus ancienne (VI) [Si Mohamed-Ab El-Kader] peut être beaucoup plus riche que la supérieure I (*id.*). Dans cette mise en parallèle, qui pourrait être moins brève, il ne faut pas oublier que les mêmes numéros n'entraînent pas le synchronisme des couches.

Les différents horizons sont inclus dans une série de calcaires phosphatés, de marnes, et de silex, puissante d'une cinquantaine de mètres (54 m. 80 à Bir-Chedda, à l'Ouest du Bassin, et 48 m. 60, au Maïat, à l'Est). C. Arambourg qui a fait de la formation une étude minutieuse, sous le rapport paléontologique, estime à plus de 100 mètres la puissance totale de la zone phosphatée⁽³⁾.

De la mise au point faite par cet auteur, on peut inférer qu'il n'y a nullement synchronisme entre les couches I des deux bassins des Ouled Abdoun et des Ganntour. Au témoignage de A. Beaugé, la couche exploitée à Louis-Gentil correspond au n° II des Ouled Abdoun⁽⁴⁾, alors que, pour C. Arambourg, les niveaux phosphatés O, I et II des Ouled Abdoun rentrent dans le complexe marno-calcaire, surmontant la couche exploitée aux Ganntour. En sorte que la couche I, mise en valeur dans ce dernier Bassin serait synchronique de la couche III des Ouled Abdoun et qu'elle correspondrait à « l'extrême début de l'Eocène (Montien) »⁽⁵⁾, les horizons inférieurs rentrant dans le Crétacé.

COUPES DÉTAILLÉES DE LA FORMATION PHOSPHATÉES DES GANNTOUR.

L'étude de la formation sur le terrain a été faite en deux points différents : 1° Le long d'une tranchée de prospection, ouverte dans la colline de Dekakra, où il est possible de l'observer dans son entier; 2° dans les galeries de la mine en exploitation et sur le carreau.

⁽¹⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 37.

⁽²⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 36.

⁽³⁾ C. ARAMBOURG. — *Op. cit.*, p. 419.

⁽⁴⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 37.

⁽⁵⁾ C. ARAMBOURG. — *Op. cit.*, p. 419.

TRANCHÉE DE DEKAKRA.

En partant de l'oued Dekakra, pour gagner peu à peu le haut de la colline, en suivant la ligne de plus grande pente, on relève la succession suivante :

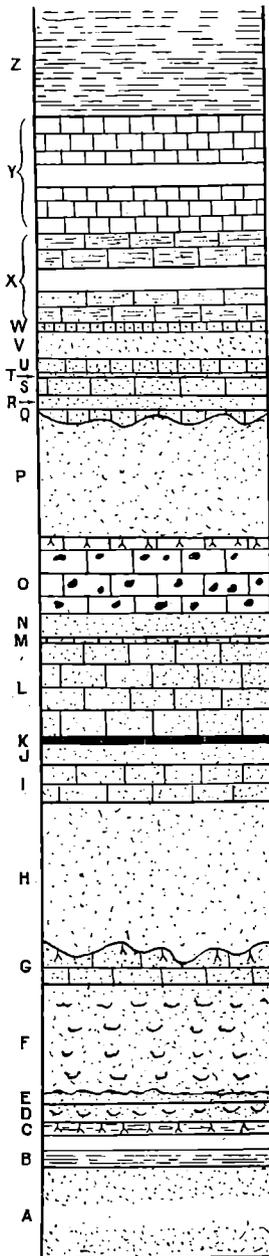


Fig. 66.

A. Sable quartzo-phosphaté, un peu ferrugineux et cohérent, parfois exclusivement formé de sable quartzeux très fin (8 m. 30). La teneur en phosphate, qui est de 12,87 p. 100 à la partie inférieure, tombe à 5,98 p. 100 au sommet. Cet horizon, qui correspond à la couche C d'Arambourg⁽¹⁾, est vraiment trop pauvre en ce point, pour être mis en évidence, en tant que niveau phosphaté digne d'être repéré⁽²⁾.

B. Argile brune (2 m.).

C. Concentration de boudins phosphatés, développés sur 0 m. 30 d'épaisseur, contigus à la partie supérieure, puis de plus en plus espacés, en descendant, et cimentés par une matière argileuse, représentant la partie terminale de l'horizon précédent. A mon sens, c'est par elle qu'il convient de faire commencer la formation phosphatée dans la coupe de Dekakra.

D. Phosphate tendre renfermant de nombreuses coquilles (0 m. 30-0 m. 35). Les boudins dont il vient d'être question le prolongent en profondeur.

E. Phosphate constituant un banc dur, dont la surface est incrustée de nombreuses coquilles, et renfermant des *Baculites* (0 m. 20). Il s'agit en réalité d'un « banc limite ».

F. Phosphate meuble, riche en coquilles calcaires très minces (0 m. 98), titrant 62,91 p. 100.

G. Calcaire phosphaté, cohérent, à silex, qui m'a fourni plusieurs *Baculites* (0 m. 52). La surface en est ravinée sur une profondeur d'au moins 0 m. 20. Quelques boudins phosphatés sont collés à la surface même du calcaire⁽³⁾.

H. Phosphate sableux (3 m.), titrant 59,98 p. 100. La présence de *borax pristodontus* l'assimile à la couche B d'Arambourg⁽¹⁾.

I. Calcaire phosphaté (0 m. 75).

J. Phosphate meuble (0 m. 47), titrant 49,24 p. 100.

K. Silex phosphaté (0 m. 10).

L. Calcaire légèrement phosphaté, affleurant à la tête du puits qui a traversé les horizons G-L (1 m. 73).

M. Calcaire phosphaté (0 m. 20).

N. Phosphate sableux (0 m. 45).

O. Calcaire, riche en silex, susceptibles de l'emporter et de constituer des brèches (1 m. 25). Cet horizon, qui sert de mur à la couche exploitée dans la mine, est particulièrement caractéristique. Non loin de la galerie, où le minerai a été exploité, ce calcaire renferme des boudins phosphatés clairsemés à sa terminaison.

(1) C. ARAMBOURG. — *Op. cit.*, p. 418, fig. 2.

(2) Dans la tranchée de Djebourat, où le même horizon est défini, on peut observer un calcaire, cohérent ou non, renfermant tout au plus de rares grains de phosphate, lorsque, par exception, il en contient.

(3) Des déblais provenant du fond d'un puits d'exploration, qui a traversé les cinq horizons suivants, renferment des blocs de calcaire mamelonné, revêtus de boudins phosphatés, correspondant probablement au calcaire G. Sur ce point, je ne puis faire état d'aucune observation personnelle, faute d'avoir pu étudier les terrains en place dans le puits. Aussi se peut-il que la coupe que j'en donne doive subir quelque retouche pour l'harmoniser avec le reste.

P. *Phosphate* meuble (2 m. 60), exploré par galerie, titrant 68,35 p. 100 composé de phosphate à grain fin, et pauvre en coprolithes, le dépôt renferme des rognons de calcaire phosphaté, plus fréquents que dans la mine et quelques taches d'aspect ferrugineux. Il correspond à la couche A de C. Arambourg⁽¹⁾ et à la couche exploitée à Louis Gentil.

Q. Calcaire phosphaté (0 m. 50), formant un toit continu, très fracturé, ravinant nettement la couche précédente sur 0 m. 25 de profondeur.

R. *Phosphate*, sableux (0 m. 40) titrant 63,74 p. 100.

S. Calcaire phosphaté (0 m. 40).

T. *Phosphate*, meuble (0 m. 10) renfermant 58,44 p. 100 de phosphate de chaux. *Cardita Coquandi* existe à ce niveau, ainsi que dans les trois précédents (Q. S.).

U. Calcaire phosphaté (0 m. 30).

V. *Sable phosphaté* plus ou moins cohérent (0 m. 50), titrant 56,02 p. 100.

W. Calcaire phosphaté (0 m. 20).

X. Calcaire phosphaté d'aspect marneux, et calcaire marneux, peu ou point stratifié (5 m. 90).

Y. Calcaire crayeux à *Fronicularia* (2 m. 25) avec perforations douteuses.

Z. Marnes (2 m. 75).

Sur la piste de Sidi-Ahmed, au delà de Dekakra, le même calcaire montre des perforations, pénétrant jusqu'à plus de 0 m. 30 de la surface. Tout dans leurs manières d'être rappelle beaucoup les digitations du phosphate argilo-ferrugineux de Kourigha.

a. Argile grise et rouge (1 m. 50).

b. Silex phosphaté (0 m. 12).

c. Calcaire légèrement phosphaté d'aspect marneux (11 m. 05).

d. Calcaire phosphaté (0 m. 25).

e. *Phosphate*, meuble (0 m. 30), titrant 63,33 p. 100.

f. Calcaire à silex, représentant la base du complexe qui sépare la formation phosphatée des calcaires à Thersitées du sommet de la colline. Très fins, ces calcaires renferment une foule de très beau silex mamelonnés, reproduisant le facies des silex ménilites du Tertiaire parisien et celui des silex, également observés au toit de la formation phosphatée de Redeyef (II, p. 466). Souvent dégagées de leur gangue, ces concrétions gisent parfois en abondance sur les pentes de la colline, où l'on peut réunir, en quelques instants, une collection témoignant d'une morphologie extrêmement variée des rognons.

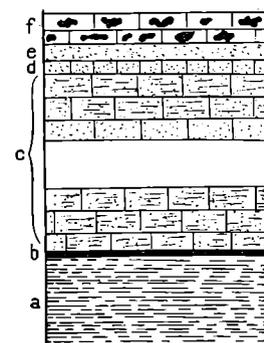


Fig. 66 a.

Ces mêmes calcaires renferment à un niveau indéterminé des silex en tables, que traversent de nombreux boudins phosphatés. En outre, de pareils boudins s'observent à la surface de débris calcaires à pâte très fine. Nul doute, en conséquence, qu'il existe au moins un horizon de boudins phosphatés dans la série des dépôts supérieurs à la formation phosphatée, et que ces dépôts recèlent pour le moins des traces de phosphate.

(1) C. ARAMBOURG. — *Op. cit.*, fig. 2, p. 418.

Dans son ensemble, cette succession revêt un aspect plus ou moins marneux, dont on a exagéré quelque peu l'importance, si bien que nombre de qualificatifs marneux doivent disparaître des descriptions données jusqu'à présent.

Dans le rapport minéralogique, il convient de signaler l'existence de diaclases tapissées de *phosphate d'urane*, localisées dans les trois horizons U, V, W.

Bien que puissant d'une cinquantaine de mètres, le complexe phosphaté analysé n'a enregistré qu'un petit nombre de ruptures d'équilibre, correspondant à des niveaux de boudins phosphatés, de faible développement, l'inférieur excepté, à des perforations ainsi qu'à des ravinnements. Au nombre des principales caractéristiques de l'ensemble, il convient de signaler la finesse des grains de phosphate, le petit nombre de coprolithes observés, la faible taille des dents et l'absence absolue de matériaux grossiers, toutes données jetant quelque lumière sur le milieu générateur. Un des faits les plus saillants à souligner est l'extrême diffusion du phosphate dans toute la masse des dépôts, témoignant que *la genèse des grains a, pour ainsi dire, été continue*. Les nombreux horizons de phosphate proprement dits résultent simplement d'une concentration mécanique, sujette à des répétitions, des grains ordinairement très éparpillés sur des fonds généralement recouverts de vases calcaires.

Tout fait supposer l'existence d'un régime quelque peu différent de celui qui a prévalu dans l'Est algérien et en Tunisie.

Il n'est pas inutile de noter, au surplus, que les phénomènes de décalcification n'ont laissé aucune trace visible dans l'ensemble des dépôts étudiés en affleurement. Rien n'est plus propre à éclairer le problème de l'état meuble des phosphates, que l'existence d'un horizon tel que F renfermant de nombreuses coquilles calcaires très minces, non dissoutes.

Enfin, il est intéressant de constater l'absence à la surface du sol et au voisinage dans les travaux de recherches, de phosphates argilo-ferrugineux, comme il s'en trouve dans le Bassin de Kourigha. C'est là un trait différentiel d'importance dont la signification a été dégagée en temps utile (p. 700).

MINE DE LOUIS GENTIL.

Maintenant que la place de la couche I est déterminée dans le complexe phosphaté, le moment est venu de noter ses caractéristiques macroscopiques essentielles, ainsi que celles du mur et du toit. En conjuguant les observations relevées sur le carreau et dans la mine, on obtient une image qui diffère sur plus d'un point important de celle qui nous est connue pour le Bassin des Ouled Abdoun.

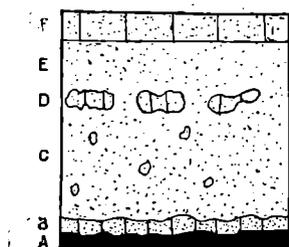


Fig. 67.

A. A. OBSERVATIONS RELEVÉES SUR LE CARREAU ET AU VOISINAGE IMMÉDIAT. — La couche exploitée est visible, en totalité, sur le carreau de la mine, avec les dépôts qui l'encaissent. Elle a pour mur les calcaires à silex observés à Dekakra (O). Le tout présente la coupe suivante, levée de bas en haut :

A. Table de silex continue (0 m. 50-0 m. 60);

B. Banc de calcaire phosphaté très dur (0 m. 30-0 m. 40). A sa partie supérieure, le banc est arrêté par une sur face irrégulière, ondulée, sans trace de perforations et d'incrustations, sauf en un point, où il englobe quelques boudins phosphatés;

C. *Couche I* (2 m.-2 m. 20) exploitée, caractérisée, notamment par l'existence de quelques nodules calcaires et la rareté des coprolithes;

D. Calcaire phosphaté (0 m. 40 en moyenne), très discontinu et réduit à des blocs irréguliers, parfois tellement éloignés les uns des autres, que les intervalles l'emportent. Il arrive même que ce toit manque complètement sur une vingtaine de mètres de longueur et qu'il y ait, de ce chef, fusion de la couche et du phosphate (e) gisant normalement au-dessus du calcaire phosphaté d. Cette discontinuité me paraît être l'œuvre d'un phénomène de ravinement et d'affouillement sur le fond de la mer — à moins qu'elle ne soit originelle et la conséquence d'une interruption de la sédimentation;

E. Phosphate (0 m. 60-0 m. 70);

F. Banc continu de calcaire phosphaté (0 m. 50-0 m. 60).

Cette continuité de l'horizon f entraîne cette conséquence que l'interruption du toit d ne peut s'expliquer par un phénomène de corrosion sous l'influence d'agents météoriques.

Le chemin montant, conduisant à la mine, offre d'excellentes conditions pour l'étude des niveaux inférieurs à la couche exploitée. Le calcaire à silex du mur s'y montre en plusieurs points singuliers, traversé dans toute son épaisseur par des sortes de *dressants de silex*. Affectant l'allure qu'indique le schéma ci-contre (fig. 68 a). En dehors de ces dressants, la succession est la suivante de bas en haut :

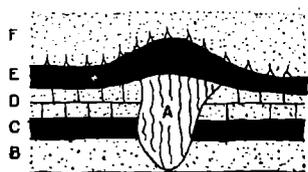


Fig. 68.

- B. Phosphate (= N de la coupe de la colline de Dekakra, p. 716).
 - C. Banc de silex continu (0^m25)
 - D. Calcaire un peu phosphaté (0^m40)
 - E. Silex en banc continu (0^m25)
 - F. Base de la couche exploitée remplie de boudins phosphatés.
- } = 0 de la coupe de la colline de Dekakra, p. 716.

Le dressant de silex, haut de 1 m. 30 dans l'exemple analysé, s'étend, depuis et y compris la partie inférieure du phosphate B jusqu'au banc de silex E exclus, qu'il relève en coupole, refoulée dans la couche phosphatée F. Il présente des divisions verticales, irrégulières, mais très nettes. Cette manière d'être, sans pareille jusqu'à présent, n'est rien moins qu'étrange. En toute explication, il faut admettre que le dressant a pris naissance postérieurement à toutes les couches qu'il traverse et à la partie du complexe qu'il déforme. Nul exemple n'est plus probant pour démontrer que des silex peuvent prendre naissance tardivement, sous une certaine épaisseur de sédiments.

Sur le bord de la route conduisant à la recette, il est possible d'observer à un niveau inférieur à la couche exploitée et à son mur, 1 m. 80 de phosphate pauvre, titrant 35,71 p. 100, caractérisé par une stratification de courant très nette (structure entrecroisée) avec quelques boudins phosphatés concentrés en un point.

B. OBSERVATIONS RELEVÉES DANS LES GALERIES D'EXPLOITATION. — Rappelons que d'après la coupe de la colline de Dekakra et celle des terrains du carreau, la couche de phosphate exploitée est encadrée par deux ruptures d'équilibre : l'inférieure, marquée par les boudins phosphatés qui entame les calcaires à silex du mur, et la supérieure par le calcaire phosphaté du toit ravinant le phosphate sous-jacent.

Épais de 2 mètres à 2 m. 20, le phosphate jouit d'une certaine cohérence, permettant d'en prélever des échantillons sans dissocier les éléments, mais une forte pression des doigts suffit pour les libérer facilement. Pauvre en coprolithes et invariablement composé de grains de taille réduite, il est en même temps dépourvu de silex et d'accidents argilo-ferrugineux. Il en résulte pour l'ensemble une homogénéité que les phosphates des Ouled Abdoun sont loin de revêtir. Les seules différenciations qu'on y observe n'interviennent que dans une très faible mesure pour en fixer la physionomie et sont réduites à deux.

1° A la première manière d'être correspondent des noyaux de «calcaire phosphaté», irréguliers ou en forme de sphéroïdes, de la taille de deux poings et, exceptionnellement, de la grosseur de la tête. Sur la cassure, ces produits se montrent ou non imprégnés d'oxyde de fer, avec une structure concentrique plus ou moins nette, à laquelle participe la matière ferrugineuse, ou complètement indifférenciés. Très espacés, ces boulets occupent n'importe quel niveau, avec une tendance à s'ordonner dans la partie moyenne. Par exception, on peut observer deux ou trois vagues alignements. Il faut voir dans ces rognons, le pendant des amas calcaires de toutes formes et de toutes dimensions, signalés dans les phosphates meubles des Ouled Abdoun, avec cette différence que les uns et les autres sont développés à une échelle foncièrement différente.

2° La seconde modalité est représentée par des concentrations globuleuses de phosphate meuble, imprégné d'oxyde de fer, dont le volume est sensiblement celui des boulets calcaires.

En l'espèce, il tombe sous le sens que ces deux types d'accidents pétrographiques sont le produit d'une ségrégation aux dépens du sable phosphaté originel.

Au fond de la mine, le toit de phosphate est loin de présenter les irrégularités observées sur le carreau. A ma connaissance, il ne montre rien de plus que des interruptions dues à de nombreuses diaclases, créant une sorte de mosaïque à la couronne. Cette mosaïque est d'autant mieux dessinée que les fentes du calcaire phosphaté sont souvent occupées par du phosphate meuble.

Une pareille constitution rend le toit très instable et nécessite un boisage serré. Par exception, le calcaire phosphaté du toit est remplacé par du silex (contre-attaque secondaire 2 de la recette 1).

ANALYSE MICROGRAPHIQUE DES PHOSPHATES DU BASSIN DES GANNTOUR.

Quelques phosphates de la coupe de Dekakra, la couche phosphatée exploitée à la mine et des échantillons provenant d'autres horizons seront successivement passés en revue.

A. CONSTITUTION DE QUELQUES HORIZONS PHOSPHATÉS DE LA COUPE DE DEKAKRA.

Les seuls niveaux qui retiendront notre attention, sont choisis parmi les plus phosphatés de la série, ce qui ne veut pas dire que les autres soient dénués d'intérêt, au point de vue pétrographique.

F⁽¹⁾. PHOSPHATE TRÈS FAIBLEMENT AGRÉGÉ (0 m. 98). — Teneur en phosphate de chaux, 62,91 p. 100.

Il consiste en un assemblage de grains arrondis ou subarrondis, tout entiers indifférenciés, les uns et les autres accompagnés d'une proportion assez élevée de fragments de tissu osseux et de grains de quartz.

Les matériaux phosphatés renferment, en proportion très variable et parfois très importante, de très menus débris organiques correspondant aux fine-washings des vases pélagiques actuelles. Il est malheureusement impossible d'en identifier un seul. L'intervention des Diatomées n'est pas démontrée. On reconnaît de tout petits cercles complets et des arcs d'épaisseur très réduite, sans microstructure discernable, susceptibles de se rapporter à des Diatomées, des bâtonnets très exigus, etc. Il s'agit évidemment de témoins d'un microplankton, pour le moment indéchiffrable.

Le groupe des Radiolaires de dimensions normales ne compte pas un seul représentant, remplacé qu'il est par des *Foraminifères* du groupe des *Textularidae*, parfois de forte taille et, d'ailleurs, d'une grande rareté en moyenne.

La gangue, qui est loin de combler tous les vides intergranulaires, est composée de calcite très microgrenue. D'ordinaire, elle se borne à cercler les grains d'une fine auréole, interrompue à leurs points de contact. Par exception, elle remplit tous les vides d'une plage d'étendue fort limitée. De très faible consistance, cette gangue libère les grains très facilement, mais on ne peut pas dire que le dépôt soit franchement meuble.

H. PHOSPHATE TRÈS FAIBLEMENT COHÉRENT (3 m). Teneur 59,98 p. 100 (Couche B. de C. Arambourg)

La roche, que de grandes affinités rattachent au type précédent, est tout à la fois plus calcaire et moins quartzreuse. Les inclusions organiques des grains restent, presque en totalité indéchiffrables. Il arrive que les petites couronnes hyalines figurent en nombre dans un seul et même individu. Un élément phosphaté renferme deux fragments de spicules d'*Eponges*; un autre contient une petite coquille treillissée, très fine, paraissant se réclamer des *Radiolaires*. Quelques grains englobent un élément de quartz, fixé n'importe où.

Les fragments de tissu osseux ont beaucoup diminué de fréquence, et les coprolithes sont absents dans les coupes minces. Les *Foraminifères*, un peu moins rares que dans l'horizon précédent sont représentés par des individus entiers ou fragmentaires.

Quant au ciment, il offre les mêmes caractères que celui du précédent horizon, avec cette double différence qu'il est plus développé et, par exception, converti en rhomboèdres, lesquels peuvent être inachevés et *vides*. Il en résulte que des cristaux de calcite arrêtent d'abord leurs contours définitifs et s'accroissent ensuite vers l'intérieur, jusqu'à complet achèvement. Un pareil développement endogène s'observe parfois dans les cristaux de quartz des roches sédimentaires⁽²⁾.

⁽¹⁾ Les lettres de référence correspondent à celle de la coupe (p. 716).

⁽²⁾ L. CATEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées (Calcaires et dolomies 1935, p. 59).

N. PHOSPHATE MEUBLE (0 m 45). Teneur 61,23 p. 100. Etroitement apparenté aux précédents par tous ses caractères, il est composé de grains plus petits, serrés les uns contre les autres et plus ou moins cimentés par de la calcite finement grenue. Ceux des éléments, qui permettent de reconnaître des témoins de microplankton, correspondent à une très faible minorité. En fait d'inclusions, on y peut observer de rares granules de quartz, plusieurs noyaux de calcite rongés, de petits rhomboédres calcaires, figurant, à raison d'un ou plusieurs dans quelques éléments phosphatés.

Les restes de tissu osseux se font rares, et il s'en faut de peu que les coprolithes ne manquent dans les préparations. Des *Foraminifères*, en très petit nombre, libres ou non, complets ou fragmentaires, s'observent à tous les états de phosphatisation, lorsqu'ils sont inclus dans les matériaux phosphatés. Toute trace de Radiolaire manque.

La gangue se résout en une calcite très finement cristallisée, remplissant à peu près tous les espaces intergranulaires. Elle emprisonne, outre des grains de quartz très clairsemés, une série de minuscules rhomboédres plus réfringents que la calcite.

P. PHOSPHATE DE L'HORIZON EXPLOITÉ A LA MINE. (2 m. 60). — Teneur 68,35 p. 100. La roche s'écarte beaucoup des précédentes par la structure de ses matériaux phosphatés. Au lieu d'être complètement indifférenciés comme ils le sont aux niveaux inférieurs, les grains réalisent plusieurs types de structure qui leur assurent une physionomie à part.

a. Des éléments, en proportion importante, sont pareils à eux-mêmes du centre à la périphérie. Ils représentent à ce niveau la variété de grains qui constitue le fond des horizons inférieurs.

b. Les grains de la première catégorie laissent parfois discerner un arrangement concentrique plutôt flou, dans lequel il faut peut-être voir un stade de transition au type suivant.

c. Une manière d'être peu répandue comme la précédente, comprend des grains différenciés à l'intérieur, dans une zone moyenne, par une structure concentrique, extrêmement fine et irrégulière, dont la limite, tant du côté externe qu'à l'intérieur, est vaguement dessinée.

d. Il existe une forte proportion de grains comprenant deux parties : un noyau central, qui n'est autre qu'un grain remanié, autour duquel s'est fixée une seconde génération de phosphate. Ce grain-noyau peut être indifférencié en totalité ou pourvu d'une enveloppe d'épaisseur variable, affichant une structure concentrique très fine, caractérisée par des feuillets se succédant irrégulièrement. Dans tous les cas, les deux éléments en présence sont étrangers l'un à l'autre, l'externe reproduisant ou non la forme générale du noyau. Il arrive que celui-ci soit très excentré par rapport à son enveloppe.

e. Un dernier type, celui-ci très rare, se résout en trois individus bien distincts, et emboîtés, dont l'histoire comporte deux remaniements successifs.

Les inclusions minérales de ces matériaux sont réduites à de rarissimes rhomboédres de calcite, et à de non moins rares grains de quartz. N'était la présence de quelques *Foraminifères* qu'on ne pourrait identifier, aucun débris organique dans les grains. Lorsque des inclusions y sont visibles

— des éléments en sont prétrisés — il est encore de toute impossibilité de démontrer que le groupe des Diatomées est représenté si peu que ce soit et de mettre une étiquette sur les innombrables débris en présence.

Les fragments de tissu osseux ne comptent que très peu de représentants accompagnés de quelques coprolithes.

Le quartz a beaucoup diminué de fréquence, et les seuls microorganismes à l'état libre relèvent des Foraminifères dont le rôle est quasi nul.

On notera, une fois de plus, l'absence des Radiolaires, tant en inclusions dans les grains que dans la gangue.

Celle-ci est constituée par de la calcite finement granuleuse, souvent réduite à une auréole autour des grains, et laissant de nombreux espaces vides, qui l'emportent au total sur l'ensemble des surfaces occupées par les granules. C'est la raison de la teneur élevée en phosphate.

R. PHOSPHATE (o m. 40). — Teneur 63,74 p. 100. La plupart des grains ont même apparence dans toute leur épaisseur; les autres présentent la différenciation superficielle correspondant à la quatrième variété de l'horizon *P*. Il y a lieu de mentionner une certaine multiplication des *Foraminifères*, à la fois dans les grains et dans la gangue. Rien n'est changé, semble-t-il, quant aux fines inclusions organiques. L'intervention très fréquente de granulations de calcite, à facies de résidu, est à signaler. Dans le domaine du ciment, il n'y a de nouveau que le comblement d'un plus grand nombre de vides par la calcite granuleuse. L'affaiblissement de la teneur en phosphate en est la conséquence.

V. PHOSPHATE MEUBLE OU PLUS OU MOINS COHÉRENT (o m. 50). — Teneur 56,02 p. 100. L'analyse d'un échantillon, choisi parmi les plus cohérents, trahit une parenté étroite avec le précédent, réserve faite quant au rôle joué par le ciment.

Il réunit dans ses grains plusieurs modes de différenciation, rappelant ceux dont il vient d'être question pour l'horizon *P*. La structure concentrique y figure avec fréquence, tantôt superficielle et tantôt interne. La notion de formation en plusieurs temps se dégage pour nombre d'individus. Ici, comme là, on observe de loin en loin, un petit rhomboèdre de calcite, et plus rarement, un grain de quartz. Les témoins de carbonate de chaux rongés sont devenus très fréquents. Comme à tous les niveaux précédents, les inclusions organiques indéchiffrables abondent.

Les *Foraminifères* se sont multipliés, tant sous forme d'inclusions dans les grains qu'à l'état libre. Parmi leurs représentants, qui sont tous d'aspect robuste, on reconnaît des *Globigérines*, des *Textulaires*, etc. Des nombreux grains passés en revue, deux seulement renferment un *Radiolaire*, incomplet, à grandes mailles.

Sans être abondant, le quartz compte des représentants de taille très différente et parfois assez volumineux.

A l'appauvrissement en phosphate très marqué, correspond un enrichissement en ciment, tel que tous les vides des variétés les plus cohérentes sont comblés, et que des grains peuvent être isolés de toutes parts dans la gangue. Suivant la règle, le carbonate de chaux est microgrenu.

B. ANALYSE DE LA COUCHE EXPLOITÉE.

(Pl. xxxix, fig. 122.)

Nous savons déjà que cette couche est douée d'une physionomie propre, tirée de la finesse de ses grains, de sa grande homogénéité d'aspect, de sa coloration très claire et de l'absence de matériaux quelque peu grossiers relevant des coprolithes. Sa teinte normale est le gris très clair, parfois nuancé de jaune. Les boulets calcaires qu'on y observe occupent sur le front de taille une place toujours négligeable, et l'on sait que les silex en sont complètement exclus.

A la loupe, l'homogénéité que le minerai accuse à l'œil nu n'est que relative. On y reconnaît, en effet, des éléments d'un diamètre plusieurs fois supérieur à celui des grains ordinaires, des éléments, anguleux ou subanguleux, plus volumineux que les autres, et le plus souvent une gangue très fine et incomplète. Tous les échantillons prélevés font effervescence aux acides.

Un rapide coup d'œil jeté sur les coupes minces fait remarquer une tendance marquée à l'uniformité de caractères des grains, la rareté des débris de tissu osseux et l'absence des coprolithes.

De forme générale arrondie, et parfois subanguleux, les grains sont de taille relativement petite, l'exclusion de volumineux matériaux souffrant quelques exceptions. Ce sont, dans la majorité des cas, des éléments purs et limpides (*a*), contigus, ou peu s'en faut, dans lesquels il est souvent possible d'observer des indices de différenciation de plusieurs sortes.

1° Des grains, constituant une faible minorité, comportent un noyau phosphaté, qui est lui-même un grain plus petit, ayant servi de centre d'attraction à un élément plus gros (*b*). La preuve que cette interprétation doit être tenue pour l'expression de la vérité, est fournie, soit par des individus composés de deux phosphates de coloration franchement distincte, soit par des nucléus revêtus d'un enduit, fixé au temps où ils étaient libres. Plusieurs dizaines de ces grains doubles et formés en deux temps peuvent être observés dans chaque coupe mince.

2° La tendance à la différenciation du phosphate des grains se manifeste de plusieurs façons. Elle donne naissance à une couronne superficielle séparée du reste de l'élément, par un trait franchement dessiné, séparation qui n'entraîne aucun changement dans les caractères de la matière. Beaucoup plus souvent, elle se traduit par le développement d'une structure concentrique très fine, dessinée par des feuillettes mal individualisés. Cette différenciation peut affecter tout ou partie d'un élément et s'observer dans un grand nombre de grains d'une coupe donnée. Il arrive que pareille structure ménage une partie centrale faisant figure de noyau indifférencié.

3° Des grains, de type plutôt rare, comportent l'existence d'une mince couronne superficielle nettement individualisée, hyaline et homogène dans toute son épaisseur. Une complication fait apparaître une couronne analogue dans l'épaisseur même du grain. Ni l'une, ni l'autre ne réagissent sur la lumière polarisée.

4° Un autre mode de différenciation réserve une place à une matière étrangère, à facies de pigment, de nature mal définie, mais non apparentée aux composés ferrugineux et aux produits hydrocarbonés. De teinte grise, gris foncé ou noirâtre, elle se détache en lumière réfléchie avec une coloration gris pâle uniforme. Cette matière intervient en proportions très variables dans des conditions très différentes, et dans toutes ses manières d'être elle souille les individus qu'elle envahit.

A. Elle affecte le facies de toutes petites mouchetures, distribuées sans la moindre ordonnance, et réunies en grand nombre ou non.

B. Les mouchetures ont une tendance à se grouper, de façon à dessiner de multiples zones concentriques discontinues, ou un simple trait plein dans l'épaisseur des grains. Elles s'observent également dans les éléments formés en deux temps, où elles se concentrent autour des noyaux qu'elles font ressortir avec une netteté particulière.

C. Des échantillons montrent les mêmes impuretés développées à dose massive, soit pour constituer de volumineux nucléus, soit pour se fixer n'importe où dans les éléments qu'elle envahit en grande partie ou en totalité. La physionomie du minerai au microscope s'en trouve considérablement modifiée.

Des individus, en nombre toujours fort restreint, voire rarissimes, possèdent un noyau quartzueux, susceptible d'être remplacé par un débris de tissu osseux. D'autres, plutôt fréquents, renferment de petites inclusions de calcite témoin.

A première vue, les grains sont en totalité de constitution homogène, impression que ne confirme pas l'examen avec de forts objectifs. En vain, examine-t-on à fond une foule d'éléments pour y chercher des restes organiques. Mais il existe dans chaque coupe mince quelques grains, montrant avec le condenseur baissé un fouillis très dense de débris organiques, dans lequel il est presque toujours difficile de reconnaître un organisme. Tenons pour certaine l'existence de *Radiolaires*, de *Diatomées* et de *Foraminifères*. Il est, en effet, possible d'identifier de très rares Radiolaires, au squelette très délicat, creusé de larges pores, représentés, à raison d'un individu par grain; de tout petits Radiolaires en cloches, susceptibles de figurer au nombre de plusieurs dans un élément donné; des Diatomées, des Radiolaires et des Foraminifères, tous incomplets et plus rares les uns que les autres. Un seul individu m'a paru se rapporter aux Globigérines. A l'exception d'une unique forme restée calcaire, les coquilles de Foraminifères sont phosphatisées. D'autres groupes ont été mis à contribution selon toutes probabilités, mais des recherches très persévérantes seraient nécessaires pour les identifier.

Ainsi que je l'ai noté au début, les coprolithes sont exclus des préparations, et les restes de tissu osseux n'interviennent qu'à titre des plus accessoires dans la constitution du dépôt.

Le quartz lui-même est un minéral peu répandu et moins fréquent qu'à Kourigha. Chaque coupe mince en peut fournir au maximum quelques dizaines de grains, dont les plus gros mesurent 0 mm. 13.

Les phosphates de la couche exploitée s'éloignent plus ou moins de l'état meuble, sans être jamais solidement agrégés. A vrai dire, il en est qui sont presque pulvérulents, ou qui le sont accidentellement. En tout état de cause, la question de la gangue est d'importance capitale au point de vue pratique, car c'est par elle que les phosphates du Bassin des Ganntour constituent une classe inférieure à celle des phosphates du Bassin des Ouled Abdoun.

Tout compte fait, quatre cas sont à distinguer :

1° L'absence de la gangue est totale (*d*) et les grains ne sont maintenus en place que par les adhérences qu'ils ont contractées à leurs points de contact. En général, il en va ainsi sur des espaces restreints;

2° Par exception, à ce qu'il semble, une très faible consistance est assurée par une pellicule de matière argileuse d'une extrême ténuité, ne correspondant dans une analyse centésimale qu'à une fraction presque négligeable.

3° La calcite intervient le plus souvent en même temps que cette matière, sous forme de menus granules, formant autour des grains des amorces de minces couronnes, voire d'auréoles complètes;

4° Le ciment est exclusivement calcaire, ce qui est le cas général. En examinant une série de coupes, on en peut suivre le développement progressif. Il se borne d'abord à revêtir les grains, ou à tapisser les vides d'une mince couche de granules de calcite, en quoi il assure au dépôt un état d'agrégation très faible. Puis le revêtement s'épaissit, et les vides sont finalement oblitérés par la calcite, réalisant toujours la même finesse de grains. Ces différents stades sont réunis ou non dans le même échantillon et ils impliquent généralement la contiguïté des matériaux constituants. Il y a, de ce chef, une différence essentielle entre le phosphate mis en exploitation à Louis Gentil et celui de Kourigha, où il est de règle que la juxtaposition imparfaite des grains entraîne l'existence de vides non remplis de calcite. Il en est une autre qui tient au facies de ce minéral, toujours largement cristallisé lorsqu'il intervient dans la constitution du minerai des Ouled Abdoun, et toujours finement grenu dans tous les phosphates des Ganntour (XLI, fig. 132). La physionomie des préparations au microscope, et principalement entre les nicols croisés, s'en trouve très modifiée.

Autant qu'il est permis de généraliser, l'absence de tout reste organique appartenant en propre à la gangue est presque absolue. Dans un seul échantillon, plusieurs *Foraminifères* à test épais, mal conservés et indéterminables ont été observés.

On voit par cette rapide description que la constitution des phosphates étudiés est on ne peut plus simple. Malgré la multiplication des préparations, je n'ai relevé aucune autre variante digne d'être mentionnée, au point de vue théorique et pratique.

Boulets calcaires de la couche exploitée. -- Peu nombreux et de dimensions réduites, ces accidents lithologiques sont en petit ce que les boulets et les amas calcaires sont en grand dans les phosphates du Bassin des Ouled Abdoun, et, notamment, dans la couche I.

Tous les échantillons analysés en coupes minces affichent des caractères identiques. Règle générale, les grains ne se touchent pas et il arrive qu'ils soient assez largement séparés de tous côtés. Il s'ensuit que le ciment ne peut être qu'originel, car, en son absence, les matériaux phosphatés eussent subi un tassement, réduisant au minimum les espaces libres. Notons que ledit ciment rappelle en tous points celui du phosphate normal, dont tous les vides sont oblitérés par de la calcite finement grenue.

Il en résulte que la place des boulets a été marquée sur le fond de la mer par une moindre fréquence des grains, entraînant un plus grand développement de la vase calcaire, génératrice de la gangue de calcite grenue.

Plusieurs fois déjà, une pareille conclusion s'est imposée à nous dans le cours de cette étude. Elle a été dictée par l'analyse des boulets calcaires de la formation phosphatée du Bassin de Gafsa et de celle du Bassin des Ouled-Abdoun. Rappelons à ce sujet que les silex de la couche I de Kourigha ont pris la place de minerais calcarifères, également caractérisés par un développement exceptionnel du ciment, ce qui revient à dire qu'une différenciation originelle du dépôt en a

fixé l'emplacement. *Ces exemples, et d'autres encore* — car le domaine des phosphates de chaux n'est pas le seul à nous fournir d'utiles documents en la matière — *nous enseignent que le fond de la mer se révèle comme le centre générateur de produits, qu'on s'accordait naguère à rapporter à des actions tardives, auxquelles la mer restait étrangère.*

Modifications subies par la couche exploitée dans la descenderie Dekakra.

Le gisement des Ganntour, situé sur le flanc sud de l'anticlinal des Rehamna, comporte l'existence d'une petite cuvette, dite de Dekakra, dont l'exploration était commencée, lors de ma visite en 1936. De forme générale elliptique, ses deux axes mesurent respectivement 1.500 et 600 mètres.

Une descenderie (chantier 3 du plan des travaux), en cours d'exécution à cette date, et arrêtée avant d'atteindre le fond, accuse une pente de 10 centimètres par mètre. Une autre (n° 2), orientée Ouest-Est, a atteint le fond de la cuvette, avec une pente variant de 0 m. 60 à 0 m. 17 par mètre, correspondant à une distance horizontale de 430 mètres. Ces travaux, qui ont été exécutés au-dessous du niveau hydrostatique, ont permis de faire et de contrôler une observation des plus intéressantes.

Imprégnation hydrocarburée (Pl. XL, fig. 125-123). — Les phosphates traversés par les descenderies diffèrent beaucoup des autres par leur coloration très foncée qui rappelle tout à fait, à l'état sec, celle de certains tourteaux d'arachides. Imprégnés de leur eau de carrière, ils sont franchement noirâtres.

Au microscope, ce changement se traduit par l'intervention d'un pigment brunâtre et noirâtre de concentration variable. Ce pigment affecte deux facies : 1° Il communique aux éléments une teinte café au lait clair très uniforme sans jamais se laisser résoudre en parties constituantes discernables; 2° A l'état très divisé, il forme de très fines ponctuations, noirâtres, isolées, ou groupées et alors susceptibles d'engendrer des amas opaques, d'aspect homogène qui ne laissent plus rien transparaître du fond phosphaté en coupes minces.

Lorsque l'analyse porte sur toute une série d'échantillons, on constate que l'imprégnation hydro-carburée réalise deux manières d'être principales : 1° Elle est réservée aux grains phosphatés et la gangue en est complètement privée (fig. 123); 2° Elle est concentrée dans la gangue, où elle prédomine, et l'on constate que les grains en sont affectés à des degrés divers (fig. 124 et 125).

Dans le cas où la pigmentation s'observe uniquement dans les grains, elle répond aux principaux types suivants (fig. 123) :

1° Les éléments sont uniformément pigmentés dans les coupes minces et revêtent une teinte café au lait clair, sans qu'il soit possible de résoudre la matière colorante en éléments constituants, si petits soient-ils (*a*);

2° Une étroite couronne noirâtre enrobe des grains teintés comme les précédents. Il s'agit alors, comme dans les exemples suivants, d'une matière pigmentaire qui masque complètement le phosphate de chaux. L'inverse est réalisé par des éléments composés d'une mince couronne à peine teintée et d'une masse opaque (*d*);

3° Des individus sont pourvus de pseudo-noyaux, correspondant à de fortes concentrations d'hydrocarbures (*b*);

4° D'autres, imprégnés dans toute leur épaisseur, sont absolument opaques (*c*);

5° Les exemples de pigmentation capricieuse ne manquent pas.

6° Lorsque les éléments phosphatés ont pris naissance en deux temps, les noyaux possèdent en propre une couronne de pigment noirâtre qu'ils ont acquise, semble-t-il, avant de servir de centre d'attraction pour la formation du second temps.

Quand l'imprégnation hydrocarbonnée n'est pas généralisée dans les grains, elle exclut ou non la présence des mouchetures grises, incluses dans les grains des phosphates de type normal. Mais il est de règle qu'elle n'implique aucun changement appréciable dans la nature et le degré de fréquence des inclusions organiques.

La fixation des hydrocarbures vient-elle à affecter la gangue de préférence, il en peut résulter des facies variables. Par exemple, tous les grains revêtent une couleur café au lait clair correspondant à une imprégnation peu prononcée, mais généralisée. Originellement composé de calcite microgrenue, le ciment a subi une profonde modification sous l'influence d'une pigmentation très développée dans une fraction seulement des granules. Tel est le cas réalisé par le phosphate que représente la figure 124. En l'espèce, c'est le carbonate de chaux de la gangue qui a concentré les hydrocarbures.

Un autre type, tiré du même échantillon que le précédent, mais d'une constitution bien différente, possède un ciment particulièrement riche en hydrocarbures (fig. 125). Des plages, d'apparence stratifiée, sont caractérisées par une alternance de traînées de calcite et de bandes de la même substance, imprégnées d'hydrocarbures à des degrés divers et, parfois, dans une telle mesure que l'armature de carbonate de chaux s'en trouve masquée complètement. Ces plages, pigmentées au maximum correspondent à un trouble très sensible dans la sédimentation, entraînant une grande extension de la gangue et, notamment, la multiplication des *Foraminifères* (*e*).

Dans toutes ses façons d'être, le pigment hydrocarbonné n'est jamais ferrugineux d'aspect. Son reflet reste plus ou moins brunâtre, comme sa teinte en lumière transmise.

Veut-on fixer la nature du produit, il suffit de frotter légèrement avec les doigts la surface des échantillons, pour en dégager l'odeur très caractéristique des hydrocarbures.

Au point de vue des conditions de gisement, les matériaux prélevés dans la descenderie Dekakra diffèrent des autres en ce qu'ils *gisent au-dessous du niveau hydrostatique*. Tout se passe, en conséquence, comme si les phosphates de la profondeur, constamment imprégnés d'eau et, de ce chef, à l'abri de l'air, avaient gardé une forte réserve d'hydrocarbures, alors que les autres mis en contact avec l'air, avaient été dépouillés peu à peu de leur provision originelle. Quant à la genèse des hydrocarbures, il faut la chercher dans le microplankton emmagasiné par les grains sur le fond de la mer, solution déjà indiquée pour certains gisements de Tunisie et d'Algérie.

Le précédent exposé laisse hors de cause le milieu où les hydrocarbures ont été élaborés. Il semble bien que la conclusion formulée, lors de l'étude des phosphates bitumineux de Tunisie et d'Algérie, soit applicable aux phosphates de la descenderie Dekakra. Dans le cas où seuls les

grains ont fixé des hydrocarbures, il est légitime d'admettre qu'ils ont été imprégnés avant leur mise en place. Au contraire, la pigmentation de la gangue, qu'elle implique ou non l'exclusion de celle des grains, ne peut s'expliquer que par une imprégnation *in situ*. Bref, la fixation en deux temps des hydrocarbures paraît s'imposer une fois de plus (II, p. 565-568).

Variations de composition du minerai en fonction de la profondeur. — La première descenderie, exécutée en 1936, a mis en évidence une réduction de teneur des phosphates, susceptible d'atteindre plus de 6 unités (71,83 à 65 p. 100). Cet appauvrissement, en fonction de la profondeur ne se manifeste pas dans la grande descenderie (descenderie 2) qui a atteint le fond de la cuvette. De l'examen attentif des teneurs, résultant de 153 prélèvements, nulle règle ne se dégage. En négligeant les échantillons recueillis au voisinage de la surface, dont la composition a pu être faussée sous l'influence des agents météoriques, on observe tout le long du plan incliné des variations désordonnées, d'amplitude totale d'environ 7 unités. Pour apprécier à sa juste valeur le défaut d'ordonnance des teneurs, il importe de ne pas perdre de vue qu'il se produit sur un flanc de la cuvette, réduit à une projection horizontale de 430 mètres, c'est-à-dire dans un domaine beaucoup trop restreint pour que l'échelonnement soit régulier et fonction de la profondeur. En d'autres termes, la cuvette est trop exiguë pour qu'elle ait enregistré des variations permettant de l'assimiler, en toute certitude, à un bassin de sédimentation.

PHOSPHATES DU MUR ET DU TOIT DE LA COUCHE EXPLOITÉE (Pl. XL, fig. 126). — Il n'y a de différence très appréciable entre le phosphate mis en valeur et celui des bancs qui l'encadrent, sous le nom de «calcaire phosphaté», qu'une moindre proportion de grains, compensée par un certain épanouissement de la gangue. Il est de règle que tous les vides intergranulaires soient comblés, et qu'ils l'aient été sur le fond de la mer, du fait que les matériaux phosphatés ne se touchent pas. Il arrive même qu'ils soient très largement séparés. Dans tous les cas, le carbonate de chaux en cause est une calcite finement grenue. D'ordinaire, la place réservée aux grains l'emporte sur celle occupée par le ciment.

De part et d'autre du type moyen se trouvent des variétés, non moins riches que les meilleurs phosphates du gisement, et d'autres, qui sont, à proprement parler, des calcaires phosphatés.

Sans que je puisse affirmer qu'il en est toujours ainsi, il y a lieu de signaler la plus grande fréquence des témoins calcaires dans les grains et une moindre rareté des inclusions de *Foraminifères*.

C. LES SILEX DE LA FORMATION PHOSPHATÉE.

Les collections des principaux types de concentrations siliceuses de la formation phosphatée des Ganttour fait ressortir l'existence d'une grande variété de facies, qui sont loin de répondre tous à des entités distinctes. A ce sujet, la très belle coupe de la colline de Dekakra fournit une gamme de types beaucoup plus diversifiés dans leur physionomie que dans leur constitution. Pour ne pas donner à ces silex une importance qu'ils n'ont pas, au point de vue de la connaissance des phosphates, je me bornerai à définir sommairement les principaux termes auxquels on peut les ramener, pour insister ensuite sur les enseignements qui découlent de leur étude.

Silex calcarifères. — Très prépondérants en moyenne, ils réalisent deux principales façons d'être, caractérisées par la diffusion du carbonate de chaux, soit dans la patine seule, soit dans le corps du silex et sa patine où elle est concentrée.

Le fond de la roche est constitué par de la calcédonite, en général moins finement cristallisée que dans les silex de la craie et de la formation phosphatée des Ouléd-Abdoun. Par exception, les fibres du minéral sont combinées en tout petits sphérolites très répandus. Du silex proprement dit, le carbonate de chaux est éliminé, en totalité ou peu s'en faut. S'il en subsiste des traces, elles se présentent sous forme de petits rhomboédres, complets ou non, mais jamais on ne peut les assimiler à des témoins de calcite simplement épargnés par la silicification. Par contre, le degré de fréquence du carbonate de chaux dans la patine est généralement très élevé, et il arrive qu'elle soit plus calcaire que siliceuse. Dans tous les cas, la calcite est cristallisée en menus rhomboédres parfaits ou incomplets, voire en petits grains de forme non géométrique sans trace de corrosion. Des *Foraminifères* silicifiés y peuvent figurer à l'état de petits noyaux de calcédonite pure, plus largement cristallisée que celle qui les cimente. Les nombreux représentants du carbonate de chaux sont inclus dans une trame d'opale et de calcédonite développées en proportions très variables, le plus souvent avec prépondérance de la calcédonite. Les patines très calcarifères sont susceptibles d'acquérir une grande épaisseur et de l'emporter sur le reste des silex.

Une manière d'être très spéciale des silex de cette catégorie donne naissance, au sommet de la formation phosphatée de la colline de Dekakra, à des silex du type *ménilite*, sujets à de grandes variations morphologiques (Pl. XL, fig. 123). Il s'agit, en l'espèce, de silex composés de calcédonite, finement cristallisée, emprisonnant de petits rhomboédres et grains de calcite non corrodés, représentant quelques unités pour cent de la totalité. La patine, quand elle existe, est des plus rudimentaires.

A ce groupe de silex calcarifères font transition des calcaires silicifiés, à facies de calcaires subliothographiques, également développés à la partie terminale du complexe phosphaté de la colline de Dekakra. Ce sont des roches jaunâtres, absolument dépourvues de grain, à cassure large, un peu comcoïdale par places, et faisant lentement effervescence aux acides. Au microscope, ils se résolvent en un fond de carbonate de chaux consolidé par une légère trame de calcédonite.

Silex à patine composée d'opale et de calcédonite. — La masse principale du silex est formée de calcédonite, moins finement cristallisée que dans les silex de la craie, composée d'opale indifférenciée très prépondérante, plus ou moins entremêlée de calcédonite. La limite des deux parties en présence est des plus capricieusement découpées. Des échantillons analysés, la calcite est presque complètement exclue.

Silex à patine calcédonieuse, imprégnée d'opale et pétrie de débris organiques. — Plus instructive que les précédentes, cette variété, développée dans les calcaires plus ou moins phosphatés du mur de la couche exploitée, réalise un type de silex à patine à la fois externe et interne. En d'autres termes, cette patine s'est développée dans toute la masse de la concrétion, comme le fait se produit dans les silex zonés⁽¹⁾, mais sans la moindre ordonnance des parties en présence. Il en résulte la formation de silex composés de deux parties diversement teintées et entremêlées :

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte géol. dét. France*, 1921, p. 441-443, 462-463).

les unes, gris clair d'aspect mat, nuancé de jaune, les autres, à cassure luisante, d'une couleur se rapprochant du chamois très foncé. Celles-ci se détachent en filots, traînées, lentilles de toutes dimensions, à contours francs, rectilignes, irréguliers et parfois accidentés de nombreuses protubérances. L'impression que donne l'ensemble est celle de silex de teinte foncée, capricieusement convertis en une patine claire, développée dans toute la masse du produit.

Sous le rapport minéralogique, il existe une différence très notable entre les deux parties en présence. Le corps principal du silex est formé de calcédonite, à laquelle s'ajoutent des éléments de calcite, en proportion généralement négligeable, et, par exception, appréciable, et quelques débris organiques visibles aux faibles grossissements. Quant à la patine, elle est composée de calcédonite fixée sur une armature d'opale indifférenciée, ce qui lui vaut au microscope, et à première vue, une grande individualité. Quelques tronçons de spicules calcédonieux, généralement privés de canal conservé, s'en détachent nettement.

L'analyse avec de forts grossissements et le condenseur fortement baissé fait ressortir dans cette patine une infinité de débris organiques. Au vraie, la roche en est pétrie. On y reconnaît, sans l'ombre d'hésitation, des *Diatomées* dominantes, quelques *Radiolaires* et *Foraminifères* et des spicules de *Spongiaires*, moins rares que dans le reste des concrétions. De surcroît, le fond laisse discerner une foule de petits arcs extrêmement fins, dérivant de Diatomées et peut-être de Radiolaires. Bref, il y a inclus dans cette patine une infinité de débris de microplankton, rivalisant par leur fréquence avec ceux des phosphates de Gafsa en particulier. C'est la première fois que dans l'étude des phosphates marocains, l'existence d'une contribution organique de pareille richesse est démontrée. L'interprétation à laquelle je me suis arrêté pour les innombrables débris organiques indéchiffrables des grains de phosphate des gisements marocains, étudiés jusqu'à présent (p. 683), me paraît s'imposer à la lumière de cette observation. En l'espèce, la silice assure une meilleure conservation au microplankton que le phosphate de chaux.

Cette constitution de la patine une fois déchiffrée, si l'on soumet à une étude minutieuse les silex en question en dehors de leur patine, on constate que leur richesse en microorganismes devait être très grande à l'origine. En identifier les restes est chose impossible pour la presque totalité. Nul doute que la patine soit redevable à son armature d'opale de l'excellente fossilisation de ses organismes microscopiques.

Brèche de silex. — Les calcaires plus ou moins phosphatés du mur de la couche exploitée m'ont également fourni une brèche de silex à laquelle s'attache un grand intérêt théorique. D'un fond siliceux très pur, étroitement apparenté d'aspect au silex typique, se détachent en très grand nombre des fragments anguleux de silex blanc ou gris, d'aspect mat, parfaitement individualisés, de dimensions très variables, atteignant au plus quelques centimètres, et ne dépassant pas le plus souvent une fraction de centimètre. Par leurs caractères physiques ces matériaux rappellent à s'y méprendre, certaines patines extrêmement développées autour de silex de la formation de Dekakra.

Au microscope, le contraste est grand entre les fragments remaniés et la gangue. Dans tous les cas, il est clair que différentes variétés de silex ont été mises à contribution :

- 1° Silex exempts d'inclusions minérales et organiques, exclusivement composés de calcédonite;
- 2° Silex plus ou moins chargés de calcite en rhomboèdres et grains informes, non corrodés,

auxquels s'ajoutent ou non de petits éléments phosphatés. Des fragments sont au moins aussi calcaires que siliceux;

3° Silex englobant à la fois des rhomboédres et grains de calcite en très faible proportion, des grains de phosphate plus ou moins nombreux et des restes organiques variés : *Foraminifères* de petite taille avec test conservé, ou de taille moyenne et tout entiers convertis en petites amandes de calcédonite, tronçons de spicules de *Spongiaires* de forme robuste, ou grêles, spicules en étoiles, les uns et les autres calcédonieux, accompagnés de quelques *Diatomées* (*Iriceratium*), et de sections circulaires ou elliptiques d'une extrême finesse, sans trace de microstructures révélatrices de leur origine. La gangue est un complexe d'opale indifférenciée et de calcédonite.

4° Silex reproduisant les caractères essentiels des patines composées d'opale dominante et de calcédonite, et comme elles riches en restes de microplankton dont une faible partie seulement peut être identifiée.

Etc.

Ces débris sont inclus dans une gangue qui en diffère profondément par sa pureté qui est grande, non moins que par l'absence absolue de restes organiques et de témoins calcaires. Cette gangue est en majeure partie composée de calcédonite concrétionnée, cristallisée en longues fibres orientées, engendrant de grands sphérolithes fondus les uns dans les autres, et susceptibles de s'orienter normalement à de petits noyaux de quartz secondaire. Je crois pouvoir dire qu'à ma connaissance le ciment de la roche en question réalise un des plus beaux types de groupements de calcédonite dans la série sédimentaire.

Le fait dominant dans l'histoire de ladite brèche est la présence à titre exclusif de représentants de silex appartenant en propre à la formation phosphatée. Parmi eux, il s'en trouve qui dérivent manifestement de l'horizon auquel la brèche est subordonnée. J'incline à croire qu'il eût été possible d'identifier en place les différentes variétés mises à contribution pour élaborer les fragments analysés si, lors de mon étude des gisements j'avais connu les caractères microscopiques de ladite brèche.

L'étude de cette brèche nous fournit un nouvel exemple de remaniement de silex dans la formation même qui leur a donné naissance, et, pour tout dire, d'un phénomène de remaniement sous-marin. De surcroît, elle apporte une nouvelle preuve de la formation sous-marine de concentrations siliceuses à facies de silex.

CONCLUSION.

Il n'est pas du tout certain que la précédente description embrasse la totalité des variétés de silex réunies dans la formation phosphatée. Pour des raisons qui échappent, leur milieu générateur s'est révélé beaucoup moins uniforme dans ses caractères que celui des silex des Ouled-Abdoun et des phosphates algéro-tunisiens. Il en résulte de multiples différences qui concourent à imprimer une physionomie particulière aux silex des Ganntour.

Abstraction faite de leur patine, ces silex sont constitués par de la calcédonite, presque toujours moins finement cristallisée que celle des silex de la craie. La présence d'une faible proportion de carbonate de chaux, revêtant la forme de minuscules rhomboédres et grains subrhomboédriques, est à signaler dans la plupart des types analysés.

La caractéristique fondamentale de ces silex est l'existence d'une patine, susceptible d'acquérir dans certains échantillons un développement exceptionnellement important, à telle enseigne qu'elle forme, à elle seule la majeure partie des concrétions. On n'a pas oublié que les silex des phosphates de Tunisie, d'Algérie et des Ouled-Abdoun au Maroc en sont privés. La plupart des patines étudiées sont très chargées de carbonate de chaux, cristallisé en très petits rhomboèdres, grains subrhomboédriques et grains irréguliers, les uns et les autres dépourvus de toutes traces de corrosion. Ce serait une erreur de voir dans ces matériaux des témoins épargnés par le mécanisme de la formation des accidents siliceux. Tous, sans exception, sont redevables de leur existence à une sursaturation de la solution qui a décalcifié les roches mères pour les silicifier. C'est un processus analogue qui a donné naissance aux nombreuses inclusions de calcite des silex de la formation phosphatée tunisienne. (II, p. 338.)

Telles de ces patines mettent en pleine évidence *la participation certaine d'un très riche microplankton à la formation des dépôts, en quoi elles apparentent d'étroite façon les bassins générateurs des phosphates nord-africains*. C'est peut-être le résultat le plus digne d'intérêt de la présente étude. De toute évidence, cette liaison signifie que le microplankton des grains phosphatés des Ganntour a été détruit à grande échelle sur le fond de la mer, avant d'être incorporé aux matériaux phosphatés. Il est non moins certain que les accidents siliceux de la formation sont fort loin de correspondre à la totalité de la silice organique de la vase-mère des phosphates et que la majeure partie en a été libérée pour rentrer dans un nouveau cycle.

Du point de vue génétique, il importe de souligner que l'existence de patines calcarifères est absolument incompatible avec la thèse soutenue jadis que les patines représentent un produit d'altération des silex, engendré sous l'influence des agents atmosphériques. A ce sujet, notons que le grand développement des patines dans le Bassin des Ganntour et leur absence dans celui des Ouled-Abdoun excluent l'intervention des phénomènes atmosphériques, et plaident en faveur de l'origine des patines antérieurement à l'émersion. Bref, il s'agit, une fois de plus, de phénomènes sous-marins.

Ajoutons, enfin, que l'analyse des silex bréchoïdes, formés en deux temps, fournit un nouvel argument en faveur de la formation de silex sous la mer.

L'existence de silex, concentrés en amas verticaux, tranchant une série d'horizons, y compris un banc de silex, refoulant les strates qui les surmontent et notamment un lit de silex interstratifié (fig. 68, p. 101), fournit, au même titre que les veines de silex de la craie un témoignage irrécusable en faveur de la formation de silex postérieurement à la sédimentation. Quant à savoir à quel moment précis de l'histoire des phosphates ces silex d'allure exceptionnelle ont pris naissance, c'est en vain que j'ai cherché les éléments d'information nécessaires pour répondre à cette question.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Ici, comme partout ailleurs, dans le Nord de l'Afrique, la genèse des grains phosphatés paraît ininterrompue pendant toute la durée de la formation du complexe phosphaté, stériles compris. La seule variable importante dans les conditions de milieu n'est autre que la préparation mécanique, susceptible d'engendrer des dépôts phosphatés à des degrés fort divers.

Des caractères positifs de l'horizon exploité, il en est quelques-uns qui le distinguent de la couche mise en valeur, dans le Bassin des Ouled-Abdoun. Telles sont l'exiguïté relative des grains, la multiplication des inclusions de calcite, en granules rongés et parfois en rhomboédres, la rareté moindre du quartz clastique englobé dans les grains, la diminution des restes de tissu osseux, ainsi que des coprolithes, et surtout la difficulté d'identifier quoi que ce soit dans le microplankton, réduit à un état de division extrême. La fréquence des grains doubles et des éléments différenciés à la périphérie, l'intervention de quelques *Foraminifères*, et le caractère invariablement microgrenu de la calcite du ciment sont également à rappeler.

S'il est vrai que nul trait fondamental ne sépare les phosphates des deux groupes, il n'est pas moins certain que la somme des différences mentionnées assure aux phosphates des Ganntour un faciès propre, permettant de les identifier sous le microscope, au premier coup d'œil, et impliquant pour le milieu sous-marin des conditions autres que celles du Bassin des Ouled-Abdoun.

En dépit de la grande rareté des microorganismes reconnaissables, on est fondé, croyons-nous, à affirmer que la contribution des *Diatomées* a dû être très prépondérante. Chaque grain représente, en réalité, une portion de fine-washings de vase à Diatomées, pétrie de débris dans lequel la destruction des carapaces est poussée à l'extrême.

Il semble bien que les *Radiolaires* soient en sérieuse régression, remplacés qu'ils sont par des *Foraminifères*. En m'exprimant ainsi, je n'ai en vue que les Radiolaires de taille normale, car il se peut que les tout petits, primitivement inclus dans les grains, aient été mis en pièces, en même temps que les valves de Diatomées.

La difficulté d'identifier les inclusions organiques des grains tient également au défaut de participation des hydrocarbures à la fossilisation des microorganismes, particularité qui s'applique également aux phosphates des Ouled-Abdoun.

Ce n'est pas que lesdits hydrocarbures soient complètement exclus des matériaux phosphatés. D'où qu'ils viennent les échantillons en renferment toujours en quantité suffisante pour que, frottés très légèrement, il s'en dégage une odeur très caractéristique. Dans le cas des phosphates de la descenderie Dekakra, c'est-à-dire des profondeurs du Bassin, l'imprégnation très prononcée des matériaux ne change rien au mode de conservation des microorganismes. Pour se faire une idée du milieu générateur des hydrocarbures, on ne perdra pas de vue que l'imprégnation s'étend à la fois aux grains et à la gangue, ce qui est l'exception dans le domaine des phosphates très riches en hydrocarbures de la Tunisie et de l'Est algérien. Il en résulte qu'une partie au moins de l'inclusion des hydrocarbures s'est faite *in situ*. On n'a pas oublié que dans le cas des phosphates tunisiens et algériens, les grains ont été mis en place avec leur provision d'hydrocarbures. Rien ne fait supposer qu'il en soit autrement pour les phosphates de la cuvette de Dekakra.

RAPPORTS ENTRE LES BASSINS DES OULED-ABDOUN ET DES GANNTOUR.

L'analyse des phosphates des Ouled-Abdoun et des Ganntour, une fois terminée, la question des rapports des deux Bassins se pose immédiatement.

1° Rappelons que la mise en parallèle des faunes de Poissons, recueillies de part et d'autre dans les couches exploitées, par C. Arambourg, a démontré le non synchronisme des deux hori-

zons, celui des Ganntour, d'âge montien, ayant sa place marquée entre les couches III et II des Ouled-Abdoun (p. 715). En d'autres termes, la couche I des Ganntour est à cheval sur le Crétacé et l'Eocène, alors que celle des Ouled-Abdoun, plus récente, est franchement tertiaire. Cette différence plaide, pour le moins, en faveur d'une certaine indépendance des deux Bassins, sinon d'une séparation radicale.

2° Les observations relevées au cours de l'analyse très sommaire des phosphates d'El Boroudj fournissent à ce sujet un élément d'information qui est loin d'être négligeable. La comparaison des phosphates d'El Boroudj avec ceux de Kourigha et des Ganntour, en faisant intervenir notamment les horizons de la colline de Dekakra qui sont sensiblement sur le même plan que ceux de Kourigha, démontre que les phosphates d'El Boroudj sont composés de matériaux plus volumineux; ils sont en même temps plus quartzeux et pourvus d'une gangue argileuse. L'accroissement très marqué de la taille des éléments phosphatés et la multiplication très sensible des grains de quartz contribuent à faire supposer l'existence d'une barrière de terre entre les deux bassins. A ce sujet, il serait très intéressant d'interroger les phosphates du Bassin des Ganntour, déposés à proximité de ceux d'El Boroudj.

3° Au nombre des données à invoquer pour souligner les différences de régime accusées par les deux Bassins, il s'en trouve quatre principales, d'inégale valeur : moindre amplitude des ruptures d'équilibre dans celui des Ganntour; réduction de volume des matériaux phosphatés, facies appartenant en propre à la gangue, et, surtout, absence des phosphates argilo-ferrugineux, qui impriment une physionomie très aberrante à la partie terminale des couches I et II des Ouled-Abdoun.

Si l'interprétation que j'ai donnée de ce type de phosphate est conforme à la vérité, son absence signifie que le Bassin des Ouled-Abdoun était moins profond que celui des Ganntour, et, partant, plus sensible aux ruptures d'équilibre. Elle signifie encore que la sédimentation argileuse, qui a modifié la partie terminale des couches II et I à Kourigha, ne s'est pas étendue au Bassin des Ganntour. A mon sens, cette exclusion des deux perturbations génératrices de matière argileuse plaide en faveur de la séparation des deux régions, ne fut-ce que pendant le dépôt d'une fraction de la formation phosphatée ⁽¹⁾.

La texture de la gangue calcaire, toujours si pareille à elle-même dans toute la formation, et si distincte de celle du ciment des phosphates des Ouled-Abdoun, implique également la séparation des deux Bassins, ou tout au moins l'absence de communication directe.

En définitive, aux différences qui viennent d'être rappelées, on ne peut opposer que des traits de parenté, tout à fait insuffisants pour en restreindre la portée. Deux solutions, et deux seulement, me paraissent devoir être envisagées : l'existence entre les deux domaines, soit d'une barrière de terres, soit d'un simple haut-fond, l'une et l'autre prolongeant vers l'Est le massif des Rehamma. Je crois devoir opter pour la première, et conclure à l'indépendance des deux Bassins.

⁽¹⁾ Il ne peut-être question de tirer argument de l'absence des phosphates argilo-ferrugineux dans la couche exploitée du fait qu'elle n'est pas synchronique de celle des Ouled-Abdoun.

BASSINS III ET IV.

RÉGION MÉRIDIONALE DU MAROC OCCIDENTAL ET DE L'ATLAS DE MARRAKECH.

GÉNÉRALITÉS.

Le vaste domaine correspondant à la région méridionale du Maroc occidental et à l'Atlas de Marrakech est séparé du Bassin des Gantour par le massif ancien des Djebilet. Au total, il comprend une série de gisements très éloignés les uns des autres, dont les produits sont loin d'être répartis sur le même plan et de dater de la même époque. Les études très appréciées que leur ont consacrées L. Moret⁽¹⁾ et Ed. Roch⁽²⁾ fourniront à mon analyse la base stratigraphique et paléontologique nécessaire, en même temps que les considérations générales fort instructives pour l'intelligence du Bassin générateur des phosphates.

J'ai rappelé plus haut (p. 664) les principales opinions formulées sur l'âge des phosphates du Maroc et montré que l'état actuel de nos connaissances se traduit par la distinction d'une série de périodes favorables au développement et à la concentration des phosphates en grande masse. Dans la région dont nous abordons maintenant l'étude, le Maëstrichtien phosphaté, en pleine régression, n'a d'importance pratique qu'en avant de la chaîne. Les recherches de L. Moret sur l'Atlas de Marrakech nous enseignent, ainsi que je l'ai déjà noté (p. 664-665), que les phosphates ont également pris naissance, et à grande échelle, au-dessus des calcaires à *Thersitea marocana*, et, conséquemment, à une date plus récente que les autres formations phosphatées du Maroc.

La région d'Imintanout, au pied même de l'Atlas, étudiée par Ed. Roch⁽³⁾ et L. Moret⁽⁴⁾, offre le grand intérêt de servir de transition entre le domaine où les phosphates antérieurs aux calcaires à Thersitées prennent un grand développement et ceux, où les phosphates existent à deux niveaux distincts, séparés par les calcaires à *Thersitea marocana*. Ajoutons qu'à Imintanout, la formation supérieure à ces calcaires est simplement amorcée et qu'il suffit de s'avancer à l'Est et au Sud, pour que les phosphates supérieurs aux calcaires à Thersitées représentent, à eux seuls, et sur de grands espaces, toute la sédimentation phosphatée de l'époque éocène.

Les travaux d'Ed. Roch et de L. Moret éclairent également un autre point important de l'histoire des phosphates marocains. Pour ce qui est du Sud-Ouest marocain, Ed. Roch a montré que, dans son ensemble, la formation phosphatée repose en transgression sur le Crétacé supérieur représenté, soit par le Maëstrichtien phosphaté (Meskala), soit par le Cénomaniens (Chichaoua), et ailleurs par le Sénonien ou le Turonien. De son côté, L. Moret a établi que le Tertiaire de l'Atlas

(1) L. MORET. — Sur l'extension des couches à phosphate dans le Haut-Atlas de Marrakech (Maroc occidental) (*C. R. Ac. Sc.*, t. CVXXXV, 1927, p. 784).

Ibid. — Sur l'extension des couches à Thersitées et à phosphate, dans le versant sud de l'Atlas de Marrakech (*Maroc*) (*C. R. Ac. Sc.*, t. 187, 1928, p. 1152).

Ibid. — Recherches géologiques dans l'Atlas de Marrakech (*Mém. Serv. Mines et Carte géol.*, 1931, 262 p., 23 pl.).

(2) Ed. ROCH. — Études géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental (*Mém. Serv. Mines et Carte géol. Maroc*, 1930, 542 p., 26 pl., 1 carte).

(3) Ed. ROCH. — *Op. cit.*, p. 467.

(4) L. MORET. — *Op. cit.*, p. 171.

de Marrakech, y compris les phosphates, est transgressif sur un Crétacé supérieur, qui est presque toujours le Sénonien. Si bien que dans le vaste domaine dont je vais caractériser les phosphates, dans la mesure où mes matériaux d'étude me le permettent, les terrains phosphatés sont partout transgressifs.

C'est ainsi, qu'une fois de plus, nous observons qu'une grande rupture d'équilibre prélude à la genèse d'importants gisements de phosphate de chaux. Sans hésiter, on peut prédire que le jour où il sera possible de soumettre les gisements de l'Atlas à une étude quelque peu détaillée, les coupes mettront en évidence des perturbations de moindre importance dans l'épaisseur même de la formation phosphatée. L'intervention de ces perturbations est tellement de règle dans le domaine des phosphates nord-africains qu'il faut s'attendre à ce qu'elle ne souffre pas d'exceptions.

Dans la description qui va suivre, je passerai successivement en revue :

A. *Les gisements de la région méridionale du Maroc occidental (Chichaoua, Meskala);*

B. *Les gisements de l'Atlas de Marrakech.*

A. GISEMENTS DE LA RÉGION MÉRIDIONALE DU MAROC OCCIDENTAL.

Il existe deux gisements situés en avant et indépendamment de la chaîne du Grand Atlas, ceux de Chichaoua et des Meskala. Dans l'un, comme dans l'autre, j'ai fait d'amples provisions de matériaux d'études en 1928.

a. GISEMENT DE CHICHAOUA.

Ce gisement, attribué par Ed. Roch⁽¹⁾ au Nummulitique, constitue un bassin de grande superficie, développé à l'Ouest de Chichaoua. D'après A. Beaugé⁽²⁾, il est caractérisé par une allure plate des couches, sauf au Sud, où elles sont souvent assez redressées, sous l'influence des mouvements orogéniques qui ont créé l'Atlas. Au dire du même auteur, la formation phosphatée, très irrégulière au point de vue teneur, titre au plus 67 p. 100 dans sa partie nord-ouest⁽³⁾.

De ce bassin, je n'ai étudié que le petit lambeau visible sur le bord et au Nord de la route de Marrakech à Mogador, décrit et figuré par Ed. Roch, dans sa coupe de Raïat⁽⁴⁾. La succession ascendante, observée par cet auteur est la suivante :

1. Grès durs, phosphatés et phosphates à *Odontaspis Winkleri*, *Lamna denticulata*, *L. subulata*, *L. acuminata*, *Otodus obliquus*, dents de *Myliobates*.
2. Banc de silex.
3. Phosphate (4 mètres).
4. Calcaires et calcaires à silex, à la cote 425.

⁽¹⁾ Ed. ROCH. — *Op. cit.*, p. 465.

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, pl. III.

⁽³⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 37.

⁽⁴⁾ Ed. ROCH. — *Op. cit.*, p. 465, fig. 73.

5. Phosphates et silex fauve (ce niveau, dans la tranchée même de la route, est encadrée par deux failles).

6. Calcaires blancs à Thersitées, à fins débris de coquilles et marnes gypseuses (cote 475).

« L'épaisseur totale de la série est très exactement de 60 mètres. »

Ces dépôts reposent directement sur le Cénomaniens, lequel, au Nord de Chichaoua (Djebel Tilda) est raviné et perforé par des Pholades ⁽¹⁾.

Faute de pouvoir réunir les éléments d'une coupe continue, permettant d'observer les perturbations enregistrées par le complexe phosphaté, je me suis borné à analyser, autant que faire se peut, les horizons minéralisés, mis en évidence par des travaux de prospection au Nord du poste de Chichaoua et de la route de Marrakech à Mogador. Les quatre termes reconnus présentent les caractères suivants :

COUCHE IV, représentant le niveau le plus inférieur observé, visible sur au moins 1 mètre dans une petite tranchée, où elle est incomplètement dégagée. Le phosphate repose sur un calcaire marneux dans lequel il pénètre par une série de boudins. Son facies est essentiellement celui d'une brèche ossifère faisant l'office de gravier. A sa partie terminale, il est entouré par des boudins phosphatés, si bien que la couche est comprise entre deux niveaux de perforations.

COUCHE III. — A, environ 4 mètres au-dessus de la couche inférieure, une recherche a fait apparaître un nouvel horizon, dont la puissance exacte ne m'est pas connue. Il repose sur des marnes gris blanc, rosées ou violacées, entraînées par un lavis de boudins phosphatés très serrés. Très consistants et de couleur rousse, ces boudins, de forme générale cylindrique, sont simples ou bifurqués. Puis suit un beau phosphate épais de 0 m. 40, riche en fragments de tissu osseux qui lui communiquent un aspect franchement bréchoïde. De grandes surfaces miroitantes font supposer l'existence d'un ciment de calcite très largement cristallisée. A sa partie supérieure, la roche passe à un phosphate extrêmement cohérent, beaucoup moins grossier, paraissant former une sorte de banc limite durci, dont les rapports avec le toit sont invisibles.

COUCHE II. — Séparée de la précédente par quelques mètres, elle est dégagée sur environ 1 m. 50, sans qu'on en puisse observer le mur et le toit. A environ 0 m. 35 de sa limite supérieure, elle renferme une concentration de quelques centimètres d'argile barriolée. Le dépôt réalise le même type de phosphate que le précédent, mais sa consistance est sensiblement plus grande.

COUCHE I. — Autant qu'il est possible d'en juger par l'état des affleurements, elle l'emporte par sa puissance sur toutes les autres. Visible sur au moins 3 mètres, le phosphate qui est à grain fin est caractérisé par une faible consistance et par une couleur gris chamois à l'état sec. On y peut observer des concentrations de quartz secondaire, sous forme d'amas et de géodes, susceptibles d'atteindre le volume du poing.

⁽¹⁾ Ed. ROCH — *Op. cit.*, p. 466.

L'horizon a pour mur un calcaire très fin, cristallin, gris rosé, formant un banc d'environ 0 m. 40 d'épaisseur, dont la base est rectiligne et la partie terminale plus ou moins mangée. Ce banc est perforé à son sommet par des boudins phosphatés, et de surcroît, il est recouvert sur une dizaine de centimètres par un phosphate dur, concrétionné, riche en petits noyaux quartzeux. La cassure fait pressentir l'intervention d'une gangue de calcite largement cristallisée.

J'ignore dans quelle mesure cette succession répond à celle que les travaux de prospection ont pu relever. Telle qu'elle est, elle suffit pour fixer les caractères lithologiques essentiels du complexe, et mettre en évidence tout ou partie des ruptures d'équilibre enregistrées.

A la surface du sol on peut recueillir des matériaux siliceux de grand intérêt. Ce sont, par exemple, des amas géodiques rappelant, trait pour trait, des «silex» observés au-dessus de la formation phosphatée, au Sud de la Tunisie (Matlaoui, II, p. 452) et au Maroc (Bassin des Ouled-Abdoun, p. 669). Ce sont, à proprement parler, des concrétions de forme très mamelonnée, teintées en blanc bleuâtre à la surface, sur une épaisseur réduite à quelques millimètres. A cette enveloppe, de nature calcédonieuse, fait suite une zone d'aspect corné, reproduisant tout à fait les caractères physiques des silex-typiques, et se prolongeant du côté externe par des apophyses qui peuvent atteindre et dépasser 1 centimètre. Représentant la masse principale, la partie interne correspond à un grand développement de quartz grenu. Des échantillons, gros comme le poing, se montrent hérissés de lames susceptibles de faire saillie sur au moins 1 centimètre, lames ordonnées de manière à dessiner un réseau polygonal à très grandes mailles. Selon toutes probabilités, ces accidents siliceux ont leur gisement entre la couche I et l'horizon à Thersités qui couronne la gara.

ANALYSE MICROGRAPHIQUE DES PHOSPHATES DE CHICHAOUA.

(Pl. XLII. fig. 133-135; Pl. XLIII. fig. 136.)

COUCHE IV (fig. 133). — J'ai désigné improprement sous ce nom un calcaire très quartzeux (*c*), renfermant de nombreux fragments anguleux de tissu osseux de toute taille (*b*), accompagnés d'une faible proportion de grains phosphatés (*a*), réalisant le type qui va être décrit dans les horizons suivants. En de certaines plages, le quartz tient une place à peu près égale à celle de la gangue de calcite (*d*).

COUCHE III (fig. 134). — Le microscope y reconnaît deux variétés, différenciées par la nature du ciment, qui est calcaire dans le type normal et silicifié dans le phosphate dur de la partie supérieure. Il s'agit, cette fois, d'un phosphate proprement dit, renfermant des débris osseux en abondance (*d*), accompagnés de grains de phosphate indifférenciés (*b, c*) et d'éléments de quartz (*e*), moins nombreux que dans le précédent horizon, mais fréquents.

Les éléments phosphatés, de couleur jaune pâle, affectent, en général, des formes globuleuses et des dimensions très diverses dans une plage donnée. Ils sont limpides (*a*) ou souillés et, à de rares exceptions près, dépourvus de restes organiques. On y peut observer de rarissimes fragments de microspicules, et, parfois, des inclusions noirâtres, sphériques ou irrégulières, analogues à celles que j'ai signalées tant de fois, principalement dans les phosphates d'Algérie et de Tunisie.

Les Diatomées et Radiolaires manquent de façon absolue, comme d'ailleurs les représentants de Foraminifères. En revanche, les inclusions minérales ne font pas défaut. Des éléments phosphatés ont pour noyau un grain de quartz, quelquefois revêtu d'une fine gaine phosphatée. D'autres, parmi les plus gros, en contiennent plusieurs. Quelques matériaux beaucoup plus volumineux et de nature variée, comprennent dans une préparation donnée : un morceau de grès à ciment de phosphate amorphe, un fragment de phosphate pur indifférencié et un débris de roche calcaire converti en un galet parfait. Phosphatés ou non, ces éléments tirent leur origine du démantèlement d'une formation tant soit peu préexistante. La calcite y figure également en inclusions. C'est, par exemple, un fragment calcaire revêtu d'une mince auréole phosphatée, ou encore, et surtout, de nombreux petits éléments calcaires inclus dans un volumineux grain.

De façon générale, la gangue est constituée par de la calcite très largement cristallisée (*f*), à telle enseigne que des plages, correspondant à une portion très importante des sections, réalisent une même orientation optique. A cette calcite indifférenciée s'ajoutent, par endroits, des rhomboédres tout à fait isolés ou groupés en grand nombre, tous à structure encapuchonnée très nette. L'existence d'une gangue phosphatée n'a été observée qu'une seule fois à l'état de phosphate amorphe.

Les phosphates silicifiés de la partie supérieure sont à la fois moins grossiers et plus riches en ciment. Celui-ci est calcédonieux et cryptocristallin, en quoi il rentre dans la catégorie des silex typiques. La seule particularité digne d'être mentionnée est la fréquence de minuscules inclusions de calcite témoin. Très limpide, le fond siliceux fait admirablement ressortir l'aspect extrêmement souillé des grains.

La roche témoigne d'actions mécaniques, qui ont fissuré, voire mis en pièces des éléments phosphatés et surtout de grands débris de tissu osseux. Le phénomène est susceptible d'entraîner un déplacement important des fragments, recimentés par de la calcite.

COUCHE II (fig. 135). — Avec cet horizon commence la série des phosphates que leurs caractères physiques paraissent rendre dignes d'intérêt au point de vue pratique. Trois traits ont le pas sur les autres : les éléments phosphatés se sont multipliés, au point de se toucher fréquemment, par compensation, les restes de tissu osseux se sont beaucoup raréfiés, en même temps, le milieu enregistre une quartzification d'une certaine ampleur (*h*, *i*).

Les grains de phosphate sont moins exigus que dans le type précédent, et réalisent presque tous une forme globuleuse, ce que dénotent leurs sections en très grande majorité subcirculaires. La plupart d'entre eux sont limpides (*a*), ou peu s'en faut, et d'apparence homogène. D'autres sont pourvus d'une zone limpide à la périphérie (*b*). Des grains ont un centre différencié, soit par l'absence, soit par la concentration d'impuretés. Certains éléments, qui trahissent aux faibles grossissements un arrangement concentrique plus ou moins vague (*c*), ne révèlent aucune différenciation du phosphate lorsqu'on les examine avec de forts objectifs. Il s'agit, évidemment, d'une ordonnance réservée aux impuretés. Une tendance à dessiner une structure concentrique superficielle s'observe fréquemment; par exception, elle se manifeste par l'existence de feuillets très minces, plus ou moins franchement séparés, et sans la moindre action sur la lumière polarisée. Un autre mode de différenciation fait intervenir des grains phosphatés, parfaitement individualisés, servant de noyau à d'autres plus volumineux. Il faut encore mentionner la présence de nucleus de quartz (*e*) et, par exception, de calcaire. Un petit élément a pour centre un gros *rhomb-*

boèdre de calcite (f), association qui fait supposer l'existence de calcite rhomboédrique, au moment de la formation des grains phosphatés. Enfin, on peut signaler de rares complexes emprisonnant de multiples grains de quartz et un grain phosphaté, résultant du remaniement d'un fragment de roche quartzophosphatée.

Des grains de phosphate, à raison d'un ou deux par coupe mince, renferment une *Globigérine*. D'autres, un peu moins rares, pétris d'inclusions noirâtres, font pressentir l'existence d'organismes très microscopiques, non déchiffrables, et, peut-être de Radiolaires embryonnaires.

Des échantillons, de très faible consistance, sont complètement dépourvus de gangue, ou tous redevables de leur très faible cohérence à une pellicule d'argile revêtant les matériaux en présence, ce qui est exceptionnel. Toutes les fois que le dépôt est tant soit peu solidement agrégé, la calcite largement cristallisée joue le rôle de gangue (i).

Un accident minéralogique, parfois très développé, y fait apparaître des plages de toutes dimensions, constituées par du quartz de cristallisation souvent très large, sans la moindre tendance à revêtir une forme géométrique. Aux plages correspondait invariablement à l'origine un développement exceptionnel du ciment calcaire à l'exclusion souvent complète des grains de phosphate. Une condition paraît nécessaire pour que ce mode de silicification intervienne : la raréfaction des matériaux phosphatés au profit de la calcite. Pareille observation a été faite maintes fois dans les pages précédentes, en étudiant les silex engendrés en milieu phosphaté.

COUCHE I (fig. 136). -- Bien qu'étroitement apparentée à la précédente, elle en diffère par plusieurs particularités, au nombre desquelles je signalerai la multiplication des grains phosphatés assez répandus pour se toucher le plus souvent, et la différenciation de certains d'entre eux. Ceux-ci ont pris naissance en deux temps, ce que démontre l'existence d'éléments doubles pourvus de noyaux nettement individualisés, représentant des grains qui ont servi de centres d'attraction à d'autres. On peut observer, par exemple, un grain à structure concentrique, inclus dans un élément complètement indifférencié (e), ou l'association de deux grains de couleur très différente. Lorsque les éléments sont simples, il arrive fréquemment qu'on y discerne une structure concentrique très fine, qui n'a jamais la netteté de celle des oolithes (b), et localisée ou non à la périphérie sur des épaisseurs variables.

La question des inclusions organiques revêt ici un grand intérêt. Chaque coupe mince fournit plusieurs grains englobant un *Foraminifère* phosphatisé à test mince. Deux *Radiolaires* seulement ont été observés, l'un et l'autre caractérisés par une coquille comportant de larges ouvertures et des épines intactes. En outre, de très rares grains contiennent des *Diatomées* d'excellente conservation, isolées ou groupées dans le même grain, appartenant, notamment, aux genres *Triceratium* et *Coscinodiscus*. Des éléments, en proportion très changeante suivant les échantillons et les coupes analysées, renferment des inclusions noirâtres, bien individualisées et pleines, dans lesquels j'ai identifié de minuscules Radiolaires globuleux, à microstructure très nette et dépourvus d'appendices. L'existence de ce microplankton autorise à penser que les inclusions noirâtres indéchiffrables, signalées dans les horizons précédents, sont bien d'origine organique.

Des matériaux phosphatés, en nombre très élevé, sont souillés, à des degrés fort divers, par une poussière fine, représentant probablement un résidu minéral laissé par des microorganismes détruits. Cette poussière peut devenir dense, au point de former un milieu d'aspect continu, occupant dans les grains une place variable, et susceptible de les rendre opaques (d). Par sa réparti-

tion très capricieuse, ladite matière détermine de grandes différences de facies dans les coupes minces.

Ce même minéral figure fréquemment dans les grains, en qualité de noyau, plus ou moins centré (*e*). A son contact, il arrive que le phosphate se différencie par une structure finement concentrique, disparaissant à une distance variable de l'inclusion. On y peut observer également, mais avec une moindre fréquence, des noyaux de calcite, rongés ou non à la périphérie. Cette même matière intervient encore à l'état de petits grains et granules très corrodés, jouant le rôle de témoins, et plus rarement de petits rhomboédres développés *in situ*.

Toutes les coupes minces renferment plusieurs grains fragmentaires, proportion correspondant à un maximum pour l'ensemble des phosphates marocains.

Dans toute son épaisseur accessible, la couche I est caractérisée par la rareté des fragments de tissu osseux, contrastant avec leur grande fréquence dans les horizons inférieurs.

Les matériaux phosphatés, autres que les grains analysés, sont clairsemés, rares ou très rares, suivant les échantillons étudiés. Ce sont de volumineux éléments indifférenciés, de forme arrondie ou non, des coprolithes susceptibles de manquer complètement dans les préparations, ou d'être représentés par plusieurs individus, des fragments de calcaire, transformés en galets submicroscopiques, visibles de loin en loin, et de rarissimes morceaux de phosphate préexistant, riches en grains de quartz, lesquels l'emportent de beaucoup sur les éléments phosphatés qui les accompagnent.

Le quartz est plus répandu dans le ciment qu'il ne l'est en moyenne dans les grains de phosphate (*f, g*). Les Foraminifères et les Radiolaires en sont complètement exclus.

Des échantillons sont riches en vides intergranulaires, partiellement remplis ou non de calcite grenue, souvent rhomboédrique. D'autres représentants de la couche ont pour gangue une calcite assez largement cristallisée pour que chacun de ses éléments embrasse des dizaines de grains phosphatés dans l'épaisseur des coupes, proportion correspondant au total à des centaines de grains (*h*).

Comme la couche II et dans une mesure plus large, ainsi que l'enseigne l'examen macroscopique, la couche J a enregistré des phénomènes de quartzification à grande échelle.

RÉSUMÉ ET CONCLUSION.

Abstraction faite des couches inférieures très apparentées aux brèches ossifères, les phosphates de Chichaoua se réclament d'une qualité qui s'étend à tous, l'exiguïté exceptionnelle des grains marchant de pair avec une tendance marquée à l'uniformité de leurs dimensions. Bref, ce sont de tous les phosphates marocains analysés jusqu'à présent ceux qui ont subi la préparation mécanique la plus prononcée. La grande fréquence des grains doubles, des éléments à structure concentrique superficielle et du quartz, libre ou engagé dans les grains phosphatés, non moins que la rareté des fragments de tissu osseux et des microorganismes conservés, sont à mettre au tout premier rang des particularités à mentionner pour les couches supérieures.

Les microorganismes n'ont été observés que dans les couches III et I, en nombre infiniment restreint, mais suffisant, pour affirmer qu'il y avait des *Diatomées*, des *Radiolaires*, des *Foramini-*

fères et des organismes indéterminés dans le milieu générateur des grains phosphatés. Sous le nom d'organismes indéterminés, je désigne les microspicules et les éléments globuleux très microscopiques, nombre de fois mentionnés dans les pages précédentes. L'abondance des impuretés, d'origine presque certainement organique, concentrées dans une foule de grains, fait supposer qu'un microplankton très développé a disparu.

Le remaniement d'éléments phosphatés tient une place exceptionnelle dans la formation. Outre les grains doubles déjà mentionnés, il existe, mais en fort petit nombre des complexes phosphatés, voire des matériaux étrangers, tels que des galets calcaires submicroscopiques.

Presque tous les échantillons analysés rentrent dans la catégorie des phosphates à ciment calcaire, lequel réserve ou non une place à des vides. Deux exceptions de nulle importance font intervenir, soit une pellicule d'argile contribuant à fixer les grains (II), soit une très petite quantité de phosphate amorphe (III). Règle générale, la calcite du ciment est largement cristallisée.

Des phénomènes de silicification ont engendré des phosphates à gangue de silex typique, et déterminé une quartzification, à grande échelle, du ciment calcaire des phosphates très chargés en carbonate de chaux. Dans les deux manières d'être de la silice, rien ne fait supposer qu'elle puisse procéder de Spongiaires.

En dépit de la rareté des inclusions organiques identifiables, il y a tout lieu d'admettre que l'histoire des grains rentre dans le cas général, conclusion en harmonie avec l'existence de minuscules témoins de calcite rongée qu'on y observe.

b. GISEMENT DES MESKALA.

Dans le gisement des Meskala, réduit à deux petites cuvettes sans importance, Ed. Roch⁽¹⁾ a reconnu deux horizons phosphatés, séparés par un banc de silex, l'inférieur maëstrichtien et le supérieur éonummulitique. Le premier comprend des « marnes phosphatées et silex, à concrétions calcaires, à *Pycnodonta vesicularis* en bas, et *Baculites anceps*, associés à *Cardita Beaumonti* au sommet ». Le second a pour représentants des « Phosphates et Calcaires à Thersités nummulitiques ».

D'après A. Beaugé⁽²⁾, on trouve les phosphates maëstrichtiens exploitables, notamment, dans les Meskala, où l'Office des Phosphates, négligeant les niveaux éocènes et maëstrichtiens supérieurs, sans intérêt aucun au point de vue exploitation, a étudié une série de quatre couches au-dessous d'un banc de calcaire fétide à *Cardita Beaumonti* d'Arch., *Ostrea Orvervegi* Roch, *Baculites anceps* et *Baculites* sp. L'une de ces couches, située à 30 mètres sous le banc à *Baculites*, entre deux bancs de silex massif de 2 m. 20 et 3 mètres d'épaisseur, titré 68 p. 100 sur 2 mètres de hauteur environ. Elle contient, en outre des dents de Squales à domaine étendu : *Lamma appendiculata* Ag., *Corax pristodontus* Ag., *Hercoglossus* sp., probablement *Danicus*, *Dyrosaurus phosphaticus* Thomas. »

⁽¹⁾ Ed. ROCH. — *Op. cit.*, p. 446.

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 26.

De cet ensemble, je ne connais guère que des affleurements étudiés, en 1928, près de Dar Caïd Kouban, là, où des travaux de prospection l'avaient exploré (Recherches Naugaret). Une saignée, pratiquée suivant la ligne de plus grande pente, entamant la colline, en face et à proximité de Dar Caïd Kouban, montre une couche inférieure attaquée par une descenderie. L'épaisseur exacte m'en est inconnue, mais elle me paraît atteindre au moins plusieurs mètres. A l'œil nu, le dépôt revêt les caractères d'une craie phosphatée tendre aux parties meubles. A sa terminaison, elle fait place à un banc durci, dans lequel j'ai relevé une trace de perforation en forme de boudin phosphaté.

Tout l'horizon est caractérisé par un phosphate à grain fin, complètement dépourvu de coprolithes et de silice, dont la pente est réduite à quelques degrés seulement. Le mur est invisible, mais c'est chose certaine qu'il est constitué par des dépôts crayeux plus ou moins durs. L'âge de cette couche inférieure est fixé par des *Baculites anceps*, recueillis en plusieurs exemplaires non loin du sommet.

D'âge éonummulitique, l'horizon supérieur est séparé du précédent par au moins 6 mètres de craies et de calcaires crayeux. Il a pour représentant une craie phosphatée, d'apparence un peu plus fine que l'inférieure, très homogène, de couleur gris jaunâtre, et, comme l'autre, privée de coprolithes et de silice. Elle aussi est durcie au sommet.

Cette craie phosphatée, dont je n'ai pu reconnaître l'épaisseur, est surmontée d'une véritable craie renfermant les parties très cohérentes.

En gagnant le sommet de la colline, on foule aux pieds des morceaux d'un autre phosphate, extraits d'un horizon, certainement supérieur aux précédents, mais invisible en place.

A quelque deux kilomètres au Nord, à proximité de la piste reliant la route de Marrakech à Dar Caïd Kouban, le sol du bled est jonché de calcaires phosphatés très durs, d'aspect oolithique, et de silice phosphatés de couleur gris bleuté, criblés de vides marquant la place de grains phosphatés dissous. La finesse des matériaux phosphatés fait supposer qu'ils relèvent de la même formation que les précédents.

[ANALYSE MICROGRAPHIQUE DES PHOSPHATES DES MESKALA.

(Pl. XLIII, fig. 137 et 138; Pl. XLIV, fig. 139-141).

COUCHE INFÉRIEURE (fig. 137) [Maëstrichtien]. — Elle est essentiellement composée de grains phosphatés de petite taille (0 mm. 2), arrondis ou non, contigus, ou peu s'en faut (*a*). Pareils à eux-mêmes dans toute leur épaisseur, ces grains sont, à quelques exceptions près, en apparence complètement dépourvus d'inclusions. Mais avec de forts grossissements et avec une excellente lumière, on y reconnaît un fouillis de très menus débris, à première vue indéchiffrables, dans lesquels on finit par identifier un très grand nombre de restes de *Diatomées* extrêmement fragmentaires. Des éléments très peu répandus sont pétris de carapaces déterminables; d'autres, moins rares, permettent d'observer de tout petits débris réticulés. D'un examen prolongé on peut conclure que la plupart des grains se résolvent en un feutrage de fragments de *Diatomées*, paraissant fondus dans le phosphate. Deux types de formes l'emportent: les unes, groupées en chaînes cylindriques, et les autres, constituées sur le modèle des *Coscinodiscus*.

Il est possible de reconnaître quelques *Radiolaires* de taille normale, qu'on ne peut silhouetter si le condenseur du microscope n'est pas au bas de sa course, tant leur fusion avec le phosphate est poussé loin. Il s'en trouve parmi eux, pourvus d'épines parfois longues.

On reconnaît encore les formes très allongées, cylindriques ou coniques, cloisonnées transversalement, dont toutes les parties sont réduites à l'épaisseur d'un trait. Il s'agit probablement d'Algues.

Contrairement à ce qui se passe dans le gisement de Chichaoua, les inclusions minérales sont très rares, en dépit de l'abondance du quartz dans la gangue (*d*). De loin en loin, un rhomboèdre de calcite figure dans les grains.

Les fragments de tissu osseux sont les plus clairsemés quand ils ne sont pas rares (*e*), et les coprolithes font défaut.

Par rapport au gisement de Chichaoua, le quartz s'est sensiblement multiplié, en même temps que la taille des minéraux a diminué. En l'espèce, il fait figure d'élément essentiel.

En général, le ciment est loin de combler tous les vides, résultant de la non-juxtaposition parfaite des matériaux. Il est essentiellement argileux, argilo-calcaire ou exclusivement calcaire (*f*). La matière argileuse se borne le plus souvent à enrober les grains sans combler tous les vides, mais elle peut être suffisamment abondante pour former une trame continue; c'est alors et accidentellement, semble-t-il, un élément important dans la roche. Indéterminable par voie optique, suivant le cas général, cette matière teintée en brun, réagit vivement sur la lumière polarisée, dans les tons les plus élevés, du premier ordre. Quant à la calcite, elle est toujours largement cristallisée.

Les parties dures subordonnées au phosphate meuble et celles qui couronnent l'horizon diffèrent du reste par leur ciment silicifié. En lumière blanche, on est tenté de rapporter la totalité de celui-ci à l'opale, en raison de sa teinte grise, de son fort relief et d'un commencement de différenciation en opale d'aspect framboisé. Mais entre les nicols croisés, le fond laisse transparaître une trame cryptocristalline de couleur ardoisée. Autrement dit, la gangue est une association très intime de silice monoréfringente et de calcédonite très finement cristallisée. A sa terminaison durcie, la couche inférieure est plus quartzreuse, moins pauvre en restes de tissu osseux, et contient quelques éléments d'origine probablement coprolithique. En même temps, la gangue se développe davantage au détriment des éléments phosphatés.

COUCHE SUPÉRIEURE (fig. 138), [Eonummulitique]. — Ses affinités avec la précédente sont très grandes. Ici comme là, les grains de phosphate sont indifférenciés (*a*). Tous se détachent avec une teinte jaune pale. Il est également nécessaire d'en passer en revue un très grand nombre pour y observer des *Diatomées* conservées. En réalité, comme il arrive souvent, ces matériaux se répartissent en trois catégories, avec toutes les transitions entre elles : des grains, en très grande majorité, ne renferment pas le plus petit débris auquel on puisse attribuer une origine organique; à l'opposé, des grains, en nombre fort restreint, permettent d'observer une ou deux *Diatomées* de conservation imparfaite, un *Triceratium*, par exemple, avec des fragments relevant du même groupe. Enfin, des éléments, peu répandus, sont pétris de débris très exigus, comme il s'en trouve dans les grains de phosphates très riches en *Diatomées*. Nul doute qu'on doive les considérer comme des termes de transition aux matériaux de la première catégorie, caractérisés par l'effacement complet des structures organisées.

Moins rares que dans la masse principale de la couche inférieure, les fragments de tissu osseux continuent à être relégués à l'arrière-plan. A un seul Foraminifère près, inclus dans la gangue, ce sont les seuls représentants des organismes libres dans le ciment.

Non moins quartzreuse (*b*) que l'horizon précédent, la couche supérieure est pourvue d'une gangue douée de caractères propres, le plus souvent. Presque tous les échantillons, autres que ceux de la partie terminale durcie, sont pourvus d'un ciment de calcite très microgrenue, qui comble ou non tous les espaces entre les grains. Beaucoup d'éléments sont simplement reliés par un cercle de granules de calcite. Il arrive que la matière argileuse figure en mélange avec cette calcite. A la partie terminale, la gangue est faite, soit de calcite largement cristallisée, en compagnie ou non de rhomboèdres, soit d'opale en voie de différenciation globulaire (*c*), et de calcédonite, susceptible de manquer.

MATÉRIAUX NON RECUEILLIS EN PLACE (Pl. XLIV, fig. 139-141). — Tous les phosphates observés en morceaux à la surface des champs ou du bled (p. 744) sont invariablement silicifiés. Nombre d'entre eux procèdent d'une roche-mère beaucoup plus riche que ceux des couches précédemment analysées, l'enrichissement pouvant être attribué dans tous les cas à une moindre fréquence du quartz et parfois à une grande raréfaction de ce minéral. Tout bien pesé, ces différences signifient que lesdits phosphates appartiennent à des couches non reconnues, ou que les horizons définis par les recherches subissent de rapides variations dans l'espace. Les données manquent pour trancher la question, mais la première hypothèse a beaucoup plus de chances d'exprimer la vérité que la seconde. Quant à l'âge de ces matériaux non recueillis en place et à une altitude supérieure à celle des deux couches décrites, il est probable qu'ils appartiennent à l'Eonummulitique. De ces matériaux voici les principales caractéristiques des plus intéressantes :

1° Au nombre des variantes observées figure une roche qui, selon les points étudiés, doit être déterminée *phosphate quartzeux* ou *brèche ossifère*, l'une et l'autre à ciment siliceux. Le type figuré (fig. 139) réalise les caractères d'une brèche ossifère composée de nombreux débris anguleux de tissu osseux (*a*), pourvus ou non d'une microstructure admirablement conservée. Quelques grains de phosphate, à facies variable, susceptibles d'être volumineux, les accompagnent (*b*), ainsi que des grains de quartz (*c*), dont le degré de fréquence varie en raison inverse de celui des fragments de tissu osseux. La gangue est composée d'opale indifférenciée (*d*), sauf en quelques points où l'on voit s'amorcer un commencement de différenciation globulaire, phénomène toujours inséparable de l'existence d'un peu de calcédonite.

2° Une autre modalité est représentée par un phosphate à ciment silicifié (fig. 140), étroitement apparenté aux silex des phosphates de la couche I de Kourigha (Pl. XXXIX, fig. 121). Les éléments phosphatés qui en constituent le fond, généralement libres dans la gangue, sont formés en totalité de grains indifférenciés, le plus souvent très chargés d'impuretés distribuées au hasard (*a*) et, par exception, tendant à s'ordonner, voire à se grouper en couronne externe (*b*). Des débris de microplankton sont nettement discernables dans une faible proportion d'entre eux (*c*). Quelques restes de tissu osseux (*d*) s'observent dans toutes les plages. Quant à la gangue (*f*), elle est à base de calcédonite cryptocristalline, accompagnée ou non de quelques granules de quartz, de petits témoins de calcite rongés et d'un très petit nombre de rhomboèdres de la même substance.

3° Les matériaux épars à la surface du sol m'ont fourni une variété aberrante de phosphate silicifié, pour le moment tout-à fait unique. Sa caractéristique est fournie par un aspect flou et corrodé des grains phosphatés (fig. 141). De très rares éléments ont subi un minimum de corrosion et gardé intacts leurs contours primitifs (*a*). D'autres ont acquis une morphologie très irrégulière, témoignant d'une profonde attaque (*b*). La gangue (*c*) réalise le type silex. C'est le seul exemple, observé jusqu'à présent, de matériaux phosphatés qui ne sont pas restés absolument indifférents aux transformations profondes subies par une gangue calcaire muée en silex typique.

En ce qui concerne les inclusions des grains phosphatés des trois types analysés, il est de règle que le quartz reste extrêmement rare même lorsqu'il abonde dans le ciment, ce qui prouve une fois de plus que la constitution desdits grains est indépendante de celle de la gangue. Par exception, dans une variété non décrite, la gamme des inclusions comprend des *Foraminifères*, de très rares *Diatomées*, parfois un feutrage de fragments difficiles à identifier, engendré par une microplanktonation en voie de destruction, et, dans un petit nombre d'éléments, de tout petits arcs hyalins, d'origine incertaine, appartenant peut-être à des Coccolithophoridés. Il est probable que la contribution insignifiante des *Diatomées*, en l'état actuel des matériaux, ne préjuge nullement de l'importance de leur degré de fréquence à l'origine.

L'interprétation des matériaux silicifiés disséminés à la surface du sol se heurte à d'insurmontables difficultés. Leur silicification est-elle originelle et leur formation comparable en tous points à celle des silex, ou résulte-t-elle d'une épigénie tardive, contemporaine du démantèlement des horizons dont ils procèdent? Dans les deux cas tous les phosphates non silicifiés auraient été éliminés lors du remaniement, et la silice dériverait d'organismes. La seconde hypothèse est pour le moins aussi vraisemblable que la première.

Conclusions. — Limitée à ces brèves données, l'analyse des phosphates du Meskala fait ressortir une étroite parenté entre les produits des deux couches; l'une crétacée et l'autre tertiaire, en même temps qu'elle met en évidence les caractères qu'ils ont en commun avec les phosphates de Chichaoua.

Les échantillons silicifiés, gisant à la surface, accentuent une certaine variabilité de caractères, et parfois des différences notables de structure et de composition organique. La fréquence des *Foraminifères* dans l'un d'eux lui assigne une place en marge des autres. L'existence de ces matériaux tend à démontrer qu'il y a, ou qu'il y avait, dans la région des Meskala, des phosphates de qualité supérieure à celle du gisement exploré.

GÉNÉRALITÉS SUR LES GISEMENTS DE LA RÉGION MÉRIDIIONALE DU MAROC OCCIDENTAL.

Les deux gisements de Chichaoua et des Meskala, s'apparentent, au premier abord, par la multiplicité des ruptures d'équilibre qui ont troublé les fonds sous-marins, ruptures toujours soulignées par des murs emprisonnant des boudins phosphatés et des horizons durcis, voire ravinés. L'une de leurs principales caractéristiques est fournie par deux particularités, d'apparence contradictoire, à savoir la réduction de volume des éléments phosphatés, marchant de pair avec une importante multiplication des grains de quartz, eux-mêmes très petits. Ceux-ci

sont inclus, à la fois dans la gangue et dans les grains phosphatés (Chichaoua), ou réservés à la gangue (Les Meskala).

Les grains de phosphate du gisement des Meskala sont indifférenciés, exception faite pour les matériaux silicifiés de la surface, ceux de Chichaoua sont en partie pourvus d'une structure concentrique superficielle, affectant ou non la matière phosphatée. Le gisement de Chichaoua a ceci de spécial que beaucoup d'éléments sont doubles, c'est-à-dire qu'ils ont été formés en deux temps.

D'une façon générale, les inclusions organiques bien conservées sont des plus rares. En revanche, l'existence d'un fouillis de minuscules débris indéchiffrables est extrêmement fréquent. Des termes de transition, suffisamment nombreux et probants, permettent de les relier à des valves de *Diatomées*, peu nombreuses, mais parfaitement conservées, si bien que les grains étaient originellement, pour la plupart du moins, pétris de cuirasses de *Diatomées*, conclusion s'appliquant aux deux gisements. De très rares *Radiolaires* de dimensions ordinaires, le plus souvent en voie de fusion avec la matière des grains, sont à signaler de part et d'autre. Il y a lieu d'ajouter des *Foraminifères*, également enfermés dans les grains, à raison de plusieurs unités, en moyenne, dans chaque coupe, sauf exception. Autant qu'il est permis de l'affirmer, les Globigérines y figurent en tout premier rang. Des phosphates, inconnus en place, différent de tous les autres par l'intervention de nombreux *Foraminifères* (Les Meskala). Des globules indifférenciés, relevant probablement du groupe des *Radiolaires* embryonnaires, et des microspicules cylindriques, les uns et les autres peu répandus, ont été observés dans des phosphates de Chichaoua. Un seul et unique tronçon de spicule d'Eponge a pu être identifié (couche inférieure des Meskala).

Sauf dans les deux couches inférieures de Chichaoua, les débris de tissu osseux sont entièrement rares ou absents, ainsi d'ailleurs que les coprolithes.

Nombreuses sont les manières d'être du ciment, qui est généralement calcaire, et parfois silicifié, argileux, argilo-calcaire, et, par exception, entièrement phosphaté. Son absence partielle n'est pas rare. Les phénomènes de quartzification développés à ses dépens revêtent une certaine ampleur dans les couches supérieures de Chichaoua.

De même que dans les autres gisements du Maroc, les complexes phosphatés empruntés à des dépôts préexistants sont des plus rares. En l'espèce, il est impossible de dire s'ils procèdent ou non d'une remise en mouvement sous-marine. Il en va autrement pour les nombreux grains doubles des minerais de Chichaoua, engendrés sur les fonds où les grains ont été élaborés.

Du point de vue génétique on peut dire, sans risque de se tromper, que l'histoire des dépôts analysés est analogue à celle des formations précédemment étudiées, c'est ce que nous enseigne le double caractère des grains qui ont gardé les témoins d'un microplankton très riche et du calcaire qui l'englobait à l'origine.

Tout bien considéré, rien d'essentiel ne sépare les phosphates de Chichaoua et des Meskala de ceux des Bassins des Ouled-Abdoun et des Ganntour. En gros, la constitution des grains est la même de part et d'autre. Les différences signalées ne sont au fond que des nuances négligeables, si l'on ne perd pas de vue le problème général à résoudre. Le fait est d'autant plus intéressant que cette parenté s'étend à des phosphates crétacés et tertiaires.

B. GISEMENTS DE L'ATLAS DE MARRAKECH.

Les phosphates de l'Atlas de Marrakech ne me sont connus que par des matériaux recueillis par Ed. Roch ⁽¹⁾ et surtout par L. Moret ⁽²⁾. Presque tous ont été prélevés sur le flanc nord de la chaîne, et les autres sur le versant sud du massif.

a. PHOSPHATES DE L'ATLAS SEPTENTRIONAL.

Les échantillons analysés sont tirés de quatre gisements différents, lesquels s'ordonnent de la façon suivante de l'Ouest à l'Est : α , *Gisement d'Imintanout*; β et γ , *Gisement d'Amismiz* et de *Médinet*, sensiblement situés sur le même méridien, celui de Médinet, au Sud, et celui d'Amismiz au Nord; δ ., *Gisement de Kik*.

 α . GISEMENT D'IMINTANOUT.

D'après A. Beaugé ⁽³⁾, le gisement d'Imintanout constitue « un synclinal à profondeur inconnue dont le flanc Sud est relevé en dresseur absolument vertical sur le bord de l'Atlas ». La partie Nord forme le flanc Sud de l'anticlinal qui sépare le gisement de Chichaoua de celui d'Imintanout, et renferme des phosphates à pendage assez faible et très exploitables.

Je prendrai pour base de mon étude la description qu'ont donnée du gisement Ed. Roch et Moret ⁽⁴⁾ et les quelques échantillons que je dois à l'obligeance d'Ed. Roch.

Au Sénonien composé de grès, marnes jaunes et rouges, succède la série suivante, visible en descendant le cours de l'oued qui coule dans la gorge d'Imintanout.

- « 1. Marnes jaunes, déjà phosphatées (10 m.).
 - « 2. Grès blancs avec silex, coupés d'un banc de calcaire (12 m.).
 - « 3. Calcaires crayeux (quelques décimètres).
 - « 4. Calcaires verdâtres (quelques décimètres).
 - « 5. Phosphate (quelques mètres).
 - « 6. Grès surmontant le phosphate (quelques mètres).
 - « 7. Marnes phosphatées et phosphates (10-15 m.).
 - « 8. Calcaire à Thersitées, en plusieurs bancs coupés de lits marneux, grès à silex, calcaire pisolithique.
 - « 9. Marnes blanches à silex (1-2 m.).
 - « 10. Grès et marnes phosphatés (1-2 m.).
 - « 11. Marnes phosphatées à rognons d'opale (quelques mètres).
 - « 12. Grès.
- Oligocène ».

⁽¹⁾ Ed. ROCH. — *Op. cit.*, p. 467-468.

⁽²⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 171.

⁽³⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 37.

⁽⁴⁾ Je prie L. Moret et Ed. Roch d'agréer l'expression de ma reconnaissance.

De cet ensemble je retiendrai les quatre horizons phosphatés dont Ed. Roch m'a fourni des représentants : deux d'entre eux, inférieurs au calcaire à Thersités, correspondent aux numéros 5 et 6 de la coupe; un troisième relève du «calcaire pisolithique», subordonné au niveau à Thersités (n° 8); le dernier dépend des «marnes phosphatées et rognons d'opale» (n° 11), supérieures au calcaire à Thersités. Il résulte du diagnostic des matériaux en coupes minces que le gisement d'Imintanout comporte au moins trois niveaux phosphatés.

1° PHOSPHATES INFÉRIEURS AU CALCAIRE A THERSITÉS, PHOSPHATE DE L'HORIZON 5.

L'unique échantillon que je possède de cette couche, la principale du gisement, revêt les caractères d'un calcaire phosphaté, ou phosphate calcaire, très quartzeux, dans tous ses représentants, et de teinte gris jaunâtre.

Au microscope, la roche se révèle plutôt grossière et confinant au poudingue. On y trouve, en effet, de petits galets parfaits, empruntés à des calcaires de différents types et à des quartzites.

Le phosphate y figure sous la forme de grains globuleux ou subanguleux, de taille très variable, tour à tour dominants ou relégués au second plan. Tous mes efforts pour découvrir un seul micro-organisme déterminable ont échoué. Mais plusieurs éléments montrent un feutrage de très menus débris, comme il s'en trouve dans les phosphates à Diatomées. A vrai dire, l'intervention de celles-ci n'est que probable.

Quelques volumineux débris de tissu osseux et d'innombrables grains de quartz de dimensions très variées, et parfois très arrondis, avec un ou deux petits éléments de glaucomie, complètent la série des matériaux réunis dans une coupe mince. Les coprolithes paraissent manquer complètement.

Les Radiolaires et les Foraminifères sont absents, aussi bien dans les grains qu'à l'état libre dans le ciment.

La gangue est à base de calcite largement cristallisée, rhomboédrique par places, et, à titre exceptionnel, de matière argileuse.

La nature grossière des produits et l'abondance du quartz viennent au premier rang des caractéristiques de l'échantillon analysé.

CALCAIRE QUARTZEUX PHOSPHATÉ (n° 6). — En majeure partie calcaire, la roche contient des grains de phosphate limpide, arrondis ou non, et très clairsemés. Aucune trace de microorganisme n'est perceptible. Quelques débris de tissu osseux et de nombreux grains de quartz complètent l'ensemble. La calcite du ciment est très largement cristallisée, grenue ou rhomboédrique. Les cristaux encapuchonnés ne manquent pas. Il s'agit, comme on le voit, d'un horizon phosphaté très pauvre.

2° PHOSPHATE ASSOCIÉ AU CALCAIRE A THERSITÉS (n° 8). — Fort instructif à plus d'un titre, ce phosphate constitue à proprement parler, un conglomérat de constitution telle qu'il est de beaucoup le plus riche des matériaux que je possède de la coupe d'Imintanout. La roche est essentiellement formée de gros éléments très discernables à l'œil nu, tous remaniés, et empruntés à des phosphates tant soit peu préexistants, doués d'une grande diversité de caractères: phosphates complètement dépourvus d'éléments détritiques, phosphates plus ou moins quartzeux, parfois pétris de grains de quartz, phosphates renfermant en plus du quartz des grains phos-

phatés susceptibles d'être nombreux et des débris de tissu osseux. Tous les passages existent entre les matériaux exempts de quartz clastique et ceux qui en sont essentiellement composés. A quelque catégorie qu'ils appartiennent, ces complexes emprisonnent de la calcite en petites inclusions rongées, voire en témoins non moins volumineux que les minéraux englobés, auxquels il faut ajouter, de loin en loin, un rhomboèdre d'origine secondaire.

La plupart de ces complexes ne renferment aucune trace de microorganismes. Il en est de très gros, pauvres en quartz, qui laissent deviner la présence d'une multitude de restes organiques, difficilement déterminables. Autant que l'identification en est possible, on reconnaît quelques *Radiolaires*, dont la silhouette peut seule entrer en ligne de compte pour baser un diagnostic, un *Foraminifère* non douteux, des *Diatomées* probables, et plusieurs bâtonnets qui dérivent peut-être des *Spongiaires*. A tout cela il faut ajouter des différenciations sous forme de taches grises, marquant selon toutes probabilités la place d'organismes, en quelque sorte fondus avec la matière phosphatée.

L'abondance des inclusions calcaires témoins, qui est la règle, prouve à l'évidence que les roches-mères des matériaux phosphatés constituaient une gamme, allant des calcaires purs à des roches plus ou moins quartzieuses, munies d'une gangue de calcite. On peut émettre plusieurs hypothèses, en ce qui concerne les produits qui en dérivent : ou bien la phosphatisation est *antérieure* au remaniement des éléments phosphatés, et ceux-ci procèdent d'une formation phosphatée préexistante de constitution très variée; ou bien elle est *postérieure*, et c'est après le démantèlement d'horizons divers que la phosphatisation est intervenue aux dépens des produits élaborés, dont quelques-uns renfermaient déjà des grains de phosphate. Dans l'un et l'autre cas, les roches-mères restent à identifier, si tant est qu'elles n'ont point disparu en totalité. Une troisième solution, peut-être plus conforme à la vérité, implique un remaniement, d'origine sous-marine, aux dépens d'une partie de la couche en voie de formation.

En plus de ces volumineux matériaux remaniés, il convient de signaler de petits grains phosphatés, parfois assez fréquents à l'état libre (0 mm. 13-0 mm. 22), quelques gros fragments de tissu osseux et des grains de quartz en petit nombre.

La gangue est tout entière de nature calcaire et microgrenue, sans la moindre inclusion organique.

Ainsi constituée, la roche a été soumise à des efforts de compression qui ont fracturé pas mal d'éléments et provoqué la formation dans certains d'entre eux de nombreuses fissures, serrées les unes contre les autres, susceptibles d'affecter les matériaux d'une même plage.

Le diagnostic qui donne la meilleure image de la roche au microscope en fait un *conglomérat phosphaté*, c'est-à-dire un produit grossier d'origine éminemment détritique.

3° PHOSPHATES SUPÉRIEURS AU CALCAIRE A THERSITÉES. (n° 11). — L'horizon déterminé « Marnes phosphatées à rognons d'opale » ne m'est connu que par un nodule, se résolvant au microscope en un grès à ciment d'opale dominante et de calcédonite, renfermant des grains phosphatés, beaucoup moins fréquents que les éléments de quartz.

Les grains phosphatés, au nombre de plus d'une centaine par coupe mince, sont anguleux et de même taille que les grains de quartz, lesquels sont petits. Il est impossible d'y reconnaître autre chose qu'un *Foraminifère* dans chaque préparation, mais plusieurs d'entre eux contiennent

un feutrage de débris de dimensions extrêmement réduites, généralement révélateurs de l'existence d'une foule de Diatomées détruites à un moment donné. De petits morceaux de tissu osseux sont associés aux grains phosphatés.

Quant au ciment, il est composé d'opale que différencie une amorce de structure globulaire, et, par exception, de calcédonite dominante.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Tous les phosphates d'Imintanout sont très quartzeux et pauvres, sauf ceux qui relèvent de l'horizon à Thersitées. Ces derniers se singularisent par la grande prédominance de gros matériaux remaniés, empruntés à des roches diverses, pourvues ou non de grains phosphatés, et trahissant tous un phénomène de phosphatisation du carbonate de chaux.

Ce que fut le rôle des micro-organismes dans la constitution des complexes remis en mouvement, il est impossible de le dire. Tout au plus peut-on affirmer, dans le cas le plus favorable, qu'il y avait des *Radiolaires*, des *Foraminifères*, la présence des *Diatomées* restant incertaine.

Un phosphate, tel que celui de l'horizon à Thersitées a dû prendre naissance à proximité, soit d'une terre émergée, soit d'un haut-fond. A vrai dire, il fait figure d'exception pour le Maroc, en ce sens qu'il réserve une très grande place aux complexes phosphatés remaniés.

β. GISEMENT D'AMISMIZ.

Le complexe phosphaté reconnu par L. Moret à Amismiz, sur les deux rives de l'O. Anougal montre sur celle de droite, à partir d'un mur de calcaire à débris d'huitres silicifiées, correspondant au niveau à Thersitées, une barre de calcaire à silex, un peu phosphatés, avec quelques débris d'ossements, surmontée de «phosphate peu épais», contenant de nombreux débris d'ossements⁽¹⁾. Sur la rive opposée, le niveau à Thersitées a pour représentant de «gros bancs de calcaires durs à silex roulés et petits cailloux siliceux et phosphatés noirs», surmontés de grès jaunâtres, puis de phosphate, en «lits grumeleux tendres»⁽²⁾.

Ces brèves indications font pressentir l'existence de phosphates renfermant de nombreux matériaux détritiques.

Un échantillon de calcaire avec silex, provenant, selon toutes probabilités, de la rive droite, permet d'assister au passage très rapide du calcaire au silex. Le premier est un calcaire à grain fin et quartzeux, se chargeant rapidement d'une telle quantité de grains de quartz que la roche se transforme en un grès à ciment calcaire. Envahi par la silice, celui-ci revêt très rapidement le caractère de grès à ciment de silex. Ces trois facies sont visibles dans l'étendue restreinte d'une préparation.

En compagnie des grains de quartz, il existe des éléments phosphatés se comptant par dizaines et tous indifférenciés. Ce sont des grains de la taille du quartz, dont quelques-uns ont pour noyau

⁽¹⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 159.

²⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 160.

un fragment de Globigérine à gros test. Toute trace de Radiolaire et de Diatomée en est exclue. Le phosphate enrobe d'une gaine très mince de nombreux grains de quartz, voire des éléments de calcite.

Les parties les plus phosphatées doivent être classées sous le nom de grès phosphaté à ciment calcaire silicifié, ou en voie de silicification.

Un second spécimen, prélevé dans les couches siliceuses à Thersitées, au Sud d'Amismiz, est un calcaire quartzeux passant au grès calcaire, l'un et l'autre un peu phosphatés, et pourvus d'une gangue en voie de silicification. Réduit à un rôle très accessoire, le phosphate constitue des grains pareils à ceux du premier échantillon.

En l'absence de données suffisantes pour fonder une généralisation, notons que les quelques échantillons remis par L. Moret rentrent dans la catégorie des phosphates très pauvres à caractère terrigène franchement accusé et beaucoup plus siliceux que phosphatés.

γ. GISEMENT DE MÉDINET.

(Pl. XLV, fig. 142-144).

Au témoignage de L. Moret, l'Eocène phosphaté engendre dans la région de Médinet «des affleurements assez étendus sur le sommet des plateaux mésozoïques»⁽¹⁾. A l'Ouest de cette localité, on observe des «bancs grumeleux ou sableux à grains phosphatés», au-dessus de calcaires grossiers siliceux à Thersitées. Notons avec L. Moret que la totalité de la formation phosphatée surmonte l'horizon à Thersitées. La puissance du dépôt m'est inconnue.

Les trois échantillons que m'a procurés L. Moret répondent à trois unités distinctes : le premier est un phosphate pauvre, largement pourvu de calcaire et de quartz clastique; le deuxième, beaucoup plus phosphaté, possède une gangue silicifiée; quant au dernier, il constitue un phosphate très glauconieux foncièrement différent des précédents.

PHOSPHATE CALCAIRE ET QUARTZEUX. — Le dépôt sollicite l'attention au microscope, avant tout par la fréquence des complexes remaniés. Entre des grains à facies crayeux et des complexes comptant des dizaines d'éléments de quartz et de phosphate, il y a tous les intermédiaires possibles. Les grains d'aspect crayeux, toujours parfaitement arrondis et ovoïdes, procèdent tous d'une roche, non moins fine que nos craies les plus fines, et sont invariablement exempts de la plus petite trace organique. A ce type se rapportent des matériaux de toute taille, parfois aussi gros que les complexes les plus volumineux (3 mm8). De cette modalité, on passe à des éléments qui se chargent peu à peu de grains de quartz, accompagnés ou non d'éléments phosphatés en nombre restreint. La proportion de grains de quartz peut s'élever, au point de l'emporter sur la gangue crayeuse, auquel cas la roche remaniée doit être classée comme grès légèrement phosphaté à gangue calcaire.

Parallèlement à cette transformation progressive des grains à facies crayeux, se développent une série d'éléments de même type, mais à gangue plus ou moins phosphatisée, jusqu'à la sup-

⁽¹⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 158.

pression complète du ciment primitif. Des matériaux de cette sorte peuvent réserver une toute petite place à de la glauconie, réalisant presque toujours le type pigmentaire. Un seul organisme à rapporter aux *Foraminifères* y a été observé.

Il existe des grains de phosphate libres, de taille ordinaire, par exception différenciés à la périphérie. La plupart renferment des inclusions calcaires en toutes proportions. Parmi ceux qui en sont privés, j'ai observé de très rares microscopiques et un *Radiolaire* en cloche, pourvu d'un test extrêmement fin. Bref, il est évident que les grains phosphatés dérivent de deux sortes de matériaux : des débris d'une ancienne vase crayeuse convertis en grains arrondis, et des éléments du type banal, empruntés à un sédiment plus ou moins siliceux et calcaire, renfermant des micro-organismes siliceux.

Plusieurs coprolithes comptant parmi les plus typiques qui aient été observés, et quelques fragments de tissu osseux sont associés aux matériaux précédents, dans l'étendue restreinte d'une préparation.

Le quartz figure également dans la gangue, et, par places, en proportion très élevée. Quelques-uns de ses éléments sont gainés de phosphate.

Très développé, le ciment est formé de calcite grenue, de calcite rhomboédrique et, à titre exceptionnel, de phosphate de chaux amorphe, emprisonnant des grains de quartz et de phosphate. Les contours très irréguliers des petites plages qui en résultent empêchent toute confusion avec les complexes remaniés.

Il est à noter que des matériaux phosphatés sont extraits de roches phosphatées préexistantes, toutes de nature plus ou moins crayeuse, que les grains appartiennent en propre au dépôt, et qu'une faible proportion de phosphate de chaux a été engendrée sur place.

L'abondance des grains de quartz, la fréquence des complexes remaniés, empruntés à toute une gamme de produits crayeux très variés, plaident en faveur de l'existence d'un rivage non éloigné, ou de hauts-fonds attaqués par des courants.

PHOSPHATE RICHE À GANGUE SILEXIFIÉE. (Fig. 142-143). — Tout différent du précédent, ce phosphate est composé de grains d'un seul et unique type, souvent contigus, accompagnés de quelques coprolithes (fig. 143, *e*) et de rares fragments de tissu osseux (*b*).

De forme arrondie ou subanguleuse, les grains (*a*) se montrent, aux faibles grossissements, souillés par d'innombrables inclusions brunes, très exiguës, mal définies et indéterminables. Avec de forts objectifs, beaucoup de formes se précisent et toutes les inclusions se révèlent d'origine organique. On reconnaît des *Radiolaires* à section circulaire ou elliptique, toujours privés d'appendices, de rares individus du groupe des *Cyrtoides*, qui ont tous conservé des traces de leur structure réticulée, puis de nombreuses sections du même groupe, en voie d'effacement progressif, des portions de réseau, montrant depuis une ou deux cellules polygonales jusqu'à plusieurs dizaines, dont l'attribution est des plus incertaines. Il existe, en outre, quelques individus sphériques, opaques, rentrant dans le groupe des *Radiolaires* embryonnaires, quelques microscopiques cylindriques, exceptionnellement fusiformes, et toujours fragmentaires, et quantité de minuscules débris indéchiffrables. Bref, il est hors de doute que les grains sont pétris de débris organiques, au premier rang desquels il faut inscrire les *Radiolaires*. Il est non moins certain que le groupe des *Diatomées* a pris part à la constitution des grains et probablement à une échelle que ne fait pas soupçonner les débris observés. On y peut reconnaître quelques valves entières

de *Triceratium*, et avec quelque fréquence des restes de réseau très fin, faiblement incurvés, procédant de formes probablement apparentées aux *Coscinodiscus*. Il est clair que nous sommes là en présence du cortège de micro-organismes, tant de fois signalé dans les grains de phosphate de l'Afrique du Nord, et du Maroc, en particulier, sauf à dire que les Radiolaires y jouent un rôle très supérieur à la moyenne observée.

En l'espèce, tous les grains phosphatés, hormi ceux qui dérivent des Vertébrés, se réclament d'un seul dépôt générateur, caractérisé par un microplankton de grande richesse, dont les Foraminifères étaient complètement exclus.

Cette composition entraîne une grande raréfaction du quartz, dont il existe seulement quelques représentants dans chaque coupe, les uns, libres dans le ciment, et les autres, inclus dans les grains de phosphate.

La gangue est, tantôt, entièrement siliceuse et cryptocristalline (fig. 142 c et fig. 143 d), tantôt, calcaréo-siliceuse, ou silico-calcaire. Dans les deux cas, il existe de nombreux vides simplement tapissés par la matière du ciment, circonstance de nature à accroître la teneur en phosphate de chaux des matériaux analysés.

La constitution qui vient d'être caractérisée est d'autant plus intéressante que le gisement de Médinet se trouve à l'intérieur de la chaîne, bien au Sud du parallèle d'Imintanout et d'Amismiz.

PHOSPHATE GLAUCONIEUX (fig. 144). — Cette troisième variété revêt le facies d'une roche noirâtre, très riche en grains de glauconie (a). Au microscope, elle rappelle à beaucoup d'égards nos phosphates albiens du Bassin de Paris. En de certaines plages, la glauconie, très oxydée, est accompagnée de pyrite. Et comme il arrive souvent, le minéral se combine très intimement au phosphate de chaux, sous forme de glauconie pigmentaire.

Le quartz en grains (b), généralement anguleux, est très répandu. Tout ce qui est étranger à la glauconie, à la pyrite et au quartz se résout en ciment de phosphate amorphe, indifférencié renfermant quelques grains de phosphate bien individualisés. Les coprolithes ainsi que les débris de tissu osseux font défaut.

Des changements brusques dans la coloration de la gangue (c-d) et dans le degré de fréquence du quartz et de la glauconie paraissent s'expliquer par la juxtaposition de volumineux éléments remaniés, si bien qu'une pareille roche relèverait des conglomérats. Une particularité tend à prouver que telle est bien l'interprétation qui s'impose. De plages, de teinte très foncée et d'apparence souillée, bourrées de microorganismes, on passe sans transition à d'autres plages dans lesquelles lesdits organismes manquent ou sont rares. Les premières constituent des *phosphates à Coccolithes*, type unique jusqu'à présent dans le vaste groupe des phosphates sédimentaires.

Il suffit d'ajouter, pour fixer les caractères essentiels de ce type de phosphate, que la section est traversée par des veinules de pyrite altérée (e), parfois très ramifiées et que le ciment phosphaté renferme de très fines paillettes de nature argileuse.

CONCLUSIONS.

Pour conclure, on peut dire que la formation de la deuxième variété correspond à un régime d'équilibre, alors que la première et la troisième, par leur nature agglomérée, témoignent d'une rupture d'équilibre qui a provoqué la concentration de matériaux remaniés. La variété glauco-

nieuse est à rapprocher du phosphate très glauconieux du Djebel Berda (Tunisie) (II, p. 442) et constitue avec lui un groupe extrêmement aberrant pour l'Afrique du Nord.

La multiplication de types si foncièrement différents fait souhaiter qu'une coupe détaillée de la formation puisse être dressée à un moment donné. Il est à prévoir qu'une pareille coupe accuserait une série de perturbations des mieux caractérisées.

δ. GISEMENT DE KIK.

(Pl. XLVI, fig. 145-147).

Situé un peu à l'Ouest du méridien de Marrakech, le gisement de Kik, d'après L. Moret, comporte sur la rive occidentale du plateau, deux horizons phosphatés supérieurs aux calcaires à Thersités. A la base et reposant sur les calcaires à Thersités, note L. Moret, il existe des « couches phosphatées d'un blanc grisâtre, pulvérulentes en surface », puis au-dessus d'un « banc de calcaires gréseux à petites huîtres » des « marnes blanches phosphatées »⁽¹⁾.

Au sommet du plateau de Kik, la formation phosphatée atteint 150-200 mètres d'épaisseur, par places, et renferme, dans sa partie moyenne, de nombreuses couches phosphatées, séparées par des bancs de calcaires durs à silex et huîtres⁽²⁾.

Cette dernière donnée nous enseigne que là comme dans les Bassins d'El-Ganntour et des Ouled Abdoun, la formation phosphatée, quoique d'origine plus récente, est caractérisée par la récurrence des horizons phosphatés. A priori, le domaine en question, est appelé à fournir des éléments de comparaison fort instructifs avec ceux qui ont été réunis jusqu'à présent, à condition de faire porter l'analyse sur un grand nombre de termes et sur les murs qui leur correspondent.

L'un des deux échantillons dont je suis redevable à L. Moret, provient du ravin de Tagadir, et plus exactement d'Agadour, à l'Est de Larjam (fig. 145-146), soit de la bordure occidentale du plateau, et l'autre du plateau même (fig. 147).

Très différents par leur teneur en phosphate, et, partout, en ciment calcaire, les deux spécimens ont un air de famille des plus prononcés, de par la constitution de leurs éléments phosphatés. Ce sont des grains jaune paille, généralement doués d'une grande limpidité. Les plus typiques des nombreux grains, dans lesquels les inclusions organiques abondent, sont parfaitement caractérisés comme *Diatomites* (fig. 146); les autres n'en diffèrent que par le degré de fréquence des valves et de leurs débris. Par leur richesse en restes de Diatomées, quelques grains rivalisent avec ceux des phosphates du Bassin de Gafsa. Les formes reconnaissables ne manquent pas, avec cette particularité que ce sont toujours les mêmes groupes qui l'emportent de beaucoup, c'est-à-dire les *Triceratium*, *Coscinodiscus*, *Melosira*, etc. Tous les stades intermédiaires s'observent entre les carapaces complètes, et celles qui sont réduites en débris à peine visibles au microscope. A vrai dire, le fond des grains est constitué par une foule de valves fragmentaires, correspondant aux *fine-washings* des vases à Diatomées actuelles. Des éléments font supposer que ces débris peuvent

⁽¹⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 161.

⁽²⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 161.

être assimilés par le phosphate, au point de disparaître sans laisser le moindre vestige. Si bien que les quelques grains complètement dépourvus du moindre reste de Diatomées ont vraisemblablement la même histoire que les autres.

De rares *Radiolaires*, phosphatisés comme les Diatomées, peuvent être identifiés, grâce à ses sections circulaires et à quelques formes en cloche dont le tissu cellulaire accuse une extrême finesse. Un seul *Foraminifère*, de taille exiguë, a été observé. Il existe, en outre, plusieurs petits tronçons de spicule, à canal conservé, témoignant d'une fragmentation poussée très loin.

Des débris de microorganismes indéterminés s'ajoutent à cet ensemble, mais en l'absence, semble-t-il, de microspicules, et de Radiolaires embryonnaires.

En fait d'inclusions minérales, il existe dans tous les éléments une très fine poussière de calcite, plus ou moins dense, constituant un résidu-témoins de calcaire que la phosphatisation a épargné. En d'autres termes, la vase à Diatomées qui fut la source des grains était calcarifère.

L'absence des restes de tissu osseux et des coprolithes est absolue.

Beaucoup plus phosphatée que la précédente, la roche prélevée à Agadour est, en même temps, quartzeuse (fig. 145, *c*). Des grains, au nombre d'une centaine au moins, figurent dans les deux sections qui y en possède. De nature calcaire, la gangue ne comble pas tous les vides que laissent les matériaux phosphatés lesquels se touchent ou non.

L'échantillon recueilli sur le plateau est à proprement parler, un calcaire à pâte de craie très fine (fig. 147, *b*), pauvre en quartz, dont les grains de phosphate sont très largement isolés.

Par leur richesse en Diatomées, les phosphates de Kik présentent un intérêt de premier ordre, au point de vue de l'analyse comparée des formations phosphatées du Maroc.

b. PHOSPHATES DE L'ATLAS MÉRIDIONAL.

Nous savons également par L. Moret que les dépôts phosphatés éocènes sont très développés sur les plateaux mésozoïques du versant Sud de l'Atlas. Et il résulte d'observations de Neltner⁽¹⁾ que les phosphates probablement éocènes existent au Nord de Taroudant (Sous).

Deux des trois gisements découverts par L. Moret se trouvent dans la région qu'il a figurée sous le nom de zone subatlasique méridionale (α), et le dernier relève des plateaux de Marouf (β).

α . PHOSPHATES DE LA RÉGION SUBATLASIQUE MÉRIDIONALE.

De cette région je puis étudier deux échantillons rapportés par L. Moret. Le plus intéressant a été recueilli sur la piste de Timountant (Kela Tamghakht); l'autre a été prélevé au Sud de Telouet (Aguerd-n' Mougat) et à l'Est du précédent.

Phosphate de la piste de Timountant. — Le complexe, observé par L. Moret le long de la piste de Timountant⁽²⁾, comprend des dépôts grossiers, et, notamment, des calcaires lumachelliques, des calcaires à petits galets de quartz, des calcaires grumeleux, etc.

⁽¹⁾ NELTNER in L. MORET. — *Op. cit.*, p. 172.

⁽²⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 166-167.

Le spécimen analysé est un silex un peu phosphaté, que je suppose appartenir à un horizon sablo-marneux à silex noirs, avec petites huîtres plissées, du groupe des *O. multicosata*. Au microscope, il présente des caractères d'un silex typique, renfermant des chambrières de calcite et des grains phosphatés très purs, de teinte jaune paille et clairsemés. Presque tous sont pétris d'inclusions organiques qui leur assurent une étroite parenté avec les grains de phosphate du plateau de Kik. On y reconnaît quelques valves entières de *Triceratium*, quantité de portions de réseau, de loin en loin un petit *Radiolaire* en cloche dont le squelette, d'une finesse extrême, paraît n'offrir aucune résistance à la destruction, ainsi qu'une foule de menus fragments indéchiffrables parce que trop exigus. En d'autres termes, on retrouve dans ces matériaux l'équivalent des *fine-washings* des vases à Diatomées d'aujourd'hui. Tous ou presque tous les grains ont gardé quelques témoins de calcite.

Les débris de tissu osseux et les coprolithes continuent à manquer. Quant au quartz, il compte seulement quelques grains tout petits dans une coupe mince.

La roche était originellement une vase calcaire très fine renfermant des éléments phosphatés. Rien ne fait supposer que les spicules d'Éponges soient la source de la silice concentrée en silex.

Roche phosphatée du plateau d'Agued-n'Mougar. — Le plateau d'Agued n'Mougar⁽¹⁾ est recouvert dans sa plus grande partie par de l'Éocène plus ou moins phosphaté. L. Moret y a signalé au-dessus d'un horizon à *Hemithersitea marocana* un niveau de marnes sableuses grises, phosphatées.

Il m'est impossible de formuler une opinion quelque peu fondée sur les phosphates de ce vaste domaine. L'unique échantillon analysé a été prélevé au niveau des calcaires à *H. marocana*, au Sud de Telouet. La roche, qui est essentiellement calcaire, renferme de nombreux débris organiques : fragments de *Bryozoaires*, plaques et piquants d'*Oursins*, *Algues* calcaires du groupe des Mélobésiées, etc., accompagnés de quelques grains de phosphate de chaux et de quartz.

Pétris d'inclusions de calcite témoin, les éléments phosphatés ne renferment pas un seul débris auquel on puisse attribuer une origine organique en toute certitude.

Ni les restes de tissu osseux, ni les coprolithes ne sont représentés.

Seul, le premier échantillon, recueilli sur la piste de Timountout, laisse entrevoir l'intérêt théorique qui s'attache aux phosphates du Sud de l'Atlas. De ce qu'il nous enseigne, on peut conclure qu'il y a parmi eux des matériaux étroitement apparentés à des phosphates de Kik, et, d'une façon plus générale, à de nombreux phosphates de l'Afrique du Nord.

β. PHOSPHATES DU PLATEAU DE MAROUF.⁽²⁾

(Pl. XLVII, fig. 148).

Les deux échantillons, qui m'ont été procurés par L. Moret, sont originaires du plateau de Tamdakht, et tous deux sont de nature grossière. L'un, étiqueté «Éocène phosphaté», a été prélevé à Timelilt; l'autre, recueilli à Taselft, représente des «concrétions phosphatées» dans des marnes sableuses, subordonnées aux calcaires à Thersitées de l'Éocène inférieur.

⁽¹⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 167-169.

⁽²⁾ L. MORET. — *Op. cit.*, p. 169.

PHOSPHATES DE TIMÉLIT. (Pl. XLVII, fig. 148). — L'échantillon analysé est une roche grossière peu consistante, composée de grains phosphatés de taille variable, pouvant atteindre et dépasser 1 millimètre, noyés dans une gangue calcaire gris jaunâtre, dominante ou non.

Au microscope, il témoigne d'une composition très variée réunissant :

De nombreux grains phosphatés, simples, limpides, et le plus souvent chargés de très fines inclusions d'aspect poussiéreux, de nature minérale ou organique (*a*);

Des complexes (*b*); non moins fréquents, renfermant des inclusions variées : quartz (*c*), parfois très répandu, éléments de phosphate, débris organiques tels que *Bryozoaires*, restes d'*Echinodermes*, de *Mollusques*, rares fragments de spicules d'*Eponges* et *Foraminifères*. Les représentants des trois premiers groupes sont en voie de phosphatisation. Les quelques Foraminifères observés se signalent par leur test exceptionnellement épais. Dans ces complexes figurent des grains phosphatés, largement auréolés de phosphate limpide (*d*), dont on ne retrouve aucune trace dans les éléments libres. Cette même auréole existe également autour de certains grains de quartz. Plusieurs de ces complexes renferment un débris de phosphate préexistant remis en mouvement. En sorte que ces matériaux résultent en dernière analyse d'un double remaniement;

Quelques morceaux de calcaires variés, convertis en petits galets;

Des organismes libres, appartenant aux mêmes groupes que ceux des matériaux remis en mouvement, et quelques éléments nouveaux, tels qu'un volumineux morceau de coquille à structure prismatique, dont la phosphatisation est très avancée, et de très rares fragments de tissu osseux. L'un des Foraminifères, non inclus dans les complexes remaniés, représente une Miliolite d'une robustesse tout à fait exceptionnelle.

L'absence des Diatomées et des Radiolaires, tant dans les grains phosphatés que dans la gangue est absolue.

Le ciment de cette roche très grossière est un calcaire très fin (*e*), renfermant quelques grains de quartz, en proportion toujours moins grande que les complexes les plus quartzueux.

Entre les nicols croisés, presque tous les matériaux phosphatés sont pétris de petits témoins calcaires rongés. Quelques éléments sont constitués par cette calcite résidu pour une fraction très importante.

On peut être tenté d'admettre que les complexes phosphatés ont pris naissance *in situ*, du fait que leurs organismes ne diffèrent pas de ceux qui sont libres dans le ciment. La vérité est que les uns et les autres ont été entraînés en même temps et qu'ils se réclament d'une même origine.

PHOSPHATES DE TASELFT. — L'échantillon étudié est un phosphate grossier, auquel se trouve solidement fixé un petit rognon de silex gris clair, non patiné, et qui se décompose en grains de teinte gris foncé, fortement agglutinés par une gangue d'un blanc mat, faisant effervescence aux acides.

Au microscope, la roche est essentiellement formée de complexes remaniés, comportant tous les intermédiaires entre les éléments réduits à leur gangue, et les morceaux réservant une place très prépondérante à des grains simples, toujours cimentés par du phosphate amorphe. Ces grains sont de deux sortes : les uns, indifférenciés dans toute leur épaisseur, et les autres, pourvus d'une structure concentrique, aussi nette que celle des oolithes typiques, développée sur des épaisseurs variables et parfois très grandes. Seule la zone différenciée réagit sur la lumière polarisée, et elle

le fait en donnant une croix noire incomplète. A quelque type qu'ils appartiennent, les grains renferment de nombreux petits témoins de calcite, y compris les rhomboèdres jouant le rôle des cristaux de calcite de certains silex. Il s'y trouve, au surplus, quantité d'impuretés, d'origine première préalablement organique, de rares grains de quartz, et des organismes en nombre des plus restreints comprenant un unique débris de *Radiolaire*, plusieurs microspicules et un fragment de piquant d'*Oursin*. Les Foraminifères manquent. La constitution d'un grain renfermant de petits fragments d'arcs très aplatis avec traces de réseau, ainsi qu'une valve de forme cylindrique fait supposer que les *Diatomées* ont contribué à la genèse des matériaux phosphatés, mais dans une mesure qui ne saurait être fixée.

A l'état libre dans le ciment, les grains simples sont très clairsemés. Quant à la gangue, elle est formée de calcite très largement cristallisée, sans la moindre trace d'organismes et pauvre en quartz.

Par ses nombreux grains réalisant la structure oolithique vraiment typique, la roche occupe une place à part dans les formations phosphatées. Sous ce rapport, elle ne peut être comparée qu'aux craies phosphatées du Nord de la France et aux phosphates de Palmyre en Syrie (I, p. 287).

Très différent de l'échantillon de Timelilt, au point de vue organique, celui de Taselft lui est apparenté, en raison du rôle considérable qu'y jouent les complexes remaniés. Certains de ceux-ci procèdent de phosphates très riches. A la vérité, les éléments composés sont d'une richesse à peu près égale, du fait que leur gangue est phosphatée sans exception. Mais il n'est pas démontré que leurs roches-mères étaient entièrement phosphatées, ciment compris. J'incline à croire, d'ailleurs, que la phosphatisation de la gangue date du remaniement et cela pour deux motifs :

La première est que les phosphates en grains non remaniés ne sont pourvus d'un ciment phosphaté que par exception; la seconde est que les matériaux phosphatés le sont généralement et par leurs grains, et par leur gangue, comme si l'épisode de remaniement comportait une minéralisation très sensible.

Un second trait de ressemblance entre les spécimens analysés tient à l'absence complète de restes de Vertébrés et de coprolithes.

Les deux échantillons revêtent le caractère de roches conglomérées, engendrées dans un milieu agité, soumettant des phosphates préexistants de type très divers à une fragmentation, suivie d'entraînement et de concentration des produits élaborés en des points d'élection. S'agit-il d'un régime applicable à toute la formation phosphatée, découverte par L. Morel, ou le hasard fait-il que les deux échantillons prélevés en des points très éloignés répondent à des exceptions? On conçoit qu'en l'état de nos connaissances, rien ne justifie le choix entre ces deux orientations diamétralement opposées.

Il importe de remarquer que la texture conglomérée n'implique pas nécessairement l'abondance des matériaux détritiques, autres que les éléments phosphatés. Nous savons, en effet, que si le phosphate de Timelilt est riche en quartz, celui de Taselft en est pauvre. Il y a, au surplus, une sérieuse différence de constitution entre les deux dépôts, le premier, très hétérogène, et le second, très homogène, de par leurs éléments remaniés. L'uniformité de caractères réalisé par celui de Taselft est peut-être la conséquence d'un remaniement sous-marin. La pénurie de matériaux soumis à l'étude micrographique nous impose la plus grande réserve à cet égard.

c. CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

A vouloir dégager une vue générale très précise de données aussi fragmentaires et éparses que sont les documents réunis dans les pages précédentes, je risquerais de me tromper du tout au tout. Il se peut que certains des matériaux décrits répondent à des exceptions; il se peut aussi que prélevés à des niveaux très différents dans la formation phosphatée, ils ne soient nullement comparables. En sacrifiant comme il convient à la prudence, j'estime qu'il est permis de formuler plusieurs enseignements, sans m'exposer à les voir infirmer avec le temps.

1° A la lumière des faits exposés, ce qui frappe le plus, c'est d'abord le caractère grossier, à des degrés divers, de la presque totalité des matériaux passés en revue, caractère qui fait contraste avec la finesse exceptionnelle des phosphates déposés en bordure de la chaîne (Les Meskala, Chichaoua) et dans les Bassins des Ganntour et des Ouled-Abdoun. C'est ensuite la grande variété de types réalisés par le nombre extrêmement restreint des échantillons prélevés. Nul doute que cette variété ne soit inférieure à la réalité. Rien de pareil n'a été observé jusqu'à présent dans les autres formations phosphatées de l'Afrique du Nord. Il est vrai que les phosphates sont, dans le domaine considéré, subordonnés aux calcaires à Thersités ou supérieurs à ces calcaires, c'est-à-dire plus récents que tous les autres. A mon sens, la question d'âge est hors de cause, et c'est dans le lien géographique existant entre ces phosphates et l'Atlas de Marrakech qu'il faut chercher la raison de leur physionomie aberrante. Autrement dit, les phénomènes précurseurs de la surrection de l'Atlas ont conditionné le milieu générateur des phosphates en question. Tel est le facteur qui domine toute l'histoire des dépôts analysés, et qui en explique le caractère exceptionnel.

2° Le régime favorable à la genèse de phosphates grossiers a pour corollaire des phénomènes de remaniement, qui impriment à nombre de ces dépôts le caractère de conglomérats.

L'existence dans certains des phosphates analysés d'une proportion fort élevée de quartz détritique, s'ajoutant aux nombreux complexes remis en mouvement, pose la question de l'existence de terres émergées à proximité des points qui ont reçu en partage une provision exceptionnelle de matériaux remaniés, tels que fragments de minerais et autres.

Sauf en deux cas, les complexes remaniés rassemblés dans une même préparation témoignent par leur constitution d'une telle variété de roches-mères que l'hypothèse d'un remaniement sous-marin est à rejeter délibérément. Par contre, les deux exceptions réalisées par des phosphates du plateau de Marouf, caractérisées par une étroite parenté entre les fragments remaniés et la roche qui les renferme, plaident en faveur d'une remise en mouvement sous la mer, aux dépens d'un seul et même dépôt phosphaté.

3° L'image qui se dégage des caractères physiques de la plupart des phosphates et du grand rôle réservé aux éléments remaniés risquerait de fausser la vue d'ensemble, si je ne rappelais que la collection des produits étudiés montre, à côté de roches grossières, des phosphates très pauvres en minéraux détritiques, procédant, les uns, d'une vase à *Radiolaires* (Médinet), et les autres, d'une vase à *Diatomées* typique (Kik, Aguerd n'Mougar), se réclamant d'un régime de haute mer.

Rien n'est contradictoire dans ces données, si l'on réfléchit à l'étendue du domaine visé, à la distance des points de prélèvement, ainsi qu'au défaut de synchronisme des horizons qui ont

fourni les matériaux soumis à l'analyse. J'ignore s'il faut attacher une portée générale à cette dualité de caractères, et si elle est la conséquence de différences de milieu, à un moment donné, ou si elle implique une différence d'âge.

Nous retiendrons que les conditions de milieu qui ont prévalu, par exception semble-t-il, à certains moments sur l'emplacement futur de tout ou partie de la chaîne, rappelaient beaucoup celles qui présidaient au dépôt des phosphates à l'époque précédente sur de vastes régions du Nord de l'Afrique.

4° Du point de vue organique, la constitution des grains phosphatés rentre dans le cas général. Des éléments parfois en grand nombre, sont dépourvus de toute trace organique; d'autres sont riches en minuscules débris indéchiffrables, mais qu'on peut rapporter avec une quasi certitude aux *Diatomées*; enfin, il en est dans quelques types, exceptionnels par rapport à l'ensemble étudié, qui sont d'une richesse en Diatomées, comparable à celle des phosphates de Gafsa. Par exception, les *Radiolaires* sont fréquents. Tout porte à croire que ces deux groupes de microorganismes ont été beaucoup plus répandus à l'origine qu'ils ne le sont à l'état fossile, et que plus d'une fois ils ont joué le même rôle que dans les phosphates nord-africains étrangers au domaine de l'Atlas. Celui qui a été réservé aux Foraminifères est nul, ou peu s'en faut. Une variété, pour le moment unique dans tout le cortège des roches phosphatées du Nord de l'Afrique, tire sa caractéristique de l'abondance des *Coccolithes* (Médinet).

La règle est comme toujours que Diatomées et Radiolaires appartiennent en propre aux grains de phosphate, et non à la gangue.

5° Les grains qui englobent des témoins de calcaire rongés sont assez fréquents pour que leur histoire comporte en toute certitude une phase de phosphatisation de carbonate de chaux, en quoi, ils rentrent dans le cas général.

6° L'ensemble des phosphates tertiaires s'enrichit avec ceux de Médinet, d'un type de nature très glauconieuse, pour le moment unique au Maroc. Il faut remonter au Volgien de Russie, à l'Albien, puis au Cénomaniens de France et aux phosphates campaniens du Djebel-Berda (Sud tunisien) pour en trouver l'équivalent.

7° A défaut des nombreux indices de rupture d'équilibre, relevés dans les coupes de détail des Bassins précédemment étudiés, sous la forme de perforations, de ravinements et de durcissement d'horizons qui jouent le rôle de murs, par rapport aux différents phosphates, nous avons, dans les caractères physiques de la plupart des matériaux analysés, et dans leur constitution observée au microscope, des témoignages suffisants pour conclure à l'existence de perturbations dans les milieux générateurs. Il est légitime d'y voir la conséquence de mouvements précurseurs de la surrection de l'Atlas.

CHAPITRE V.

PHOSPHATES DE CHAUX DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE.

A très peu d'exceptions près, les matériaux étudiés dans ce chapitre m'ont été fournis par les Services géologiques de l'Afrique occidentale et équatoriale française, que je ne saurais trop remercier de m'en confier l'étude. De leurs conditions de gisement, j'ignore souvent l'essentiel. L'image des dépôts en place, leur développement dans l'espace, et parfois leur âge me sont inconnus. Une telle ignorance restreint forcément l'intérêt théorique de mon étude, en la condamnant à rester essentiellement descriptive.

L'existence de phosphates, fussent-ils peu développés et de teneur faible, en de vastes pays qui ont besoin d'engrais phosphatés, sans qu'il leur soit toujours possible de mettre à contribution les puissantes réserves de l'Afrique du Nord, a tout naturellement retenu l'attention des pouvoirs publics et bénéficié de leur sollicitude. C'est avec l'autorisation du Gouvernement général de l'Afrique occidentale et de celui de l'Afrique équatoriale que je publie les résultats de mes analyses micrographiques.

1° PHOSPHATES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE FRANÇAISE.

La découverte des phosphates, en Afrique occidentale française, est due au commandant Friry, lequel a signalé, en 1908, que les couches inférieures de l'Eocène du Sénégal sont souvent phosphatées. En 1910, R. Chudeau⁽¹⁾ identifiait sur les bords du Sénégal, à Daoualel, des calcaires phosphatés, dont j'ai entrepris l'étude sur sa demande. La même année, j'ai reconnu dans ces calcaires des grains de phosphate à *Diatomées*, rappelant ceux du gisement de Gafsa, en Tunisie⁽²⁾, donnée justifiant, dans une certaine mesure, l'attribution de ces calcaires phosphatés à l'Eocène inférieur. En 1936, Fernand Jacquet⁽³⁾ a signalé l'existence d'une série phosphatée, notamment dans la presqu'île du Cap Vert et dans la basse vallée du Sénégal, puis noté le fait

⁽¹⁾ R. CHUDEAU. — Note sur la géologie de la Mauritanie (*B. S. G. Fr.*, 4^e s., 1911, t. XI, p. 419).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Sur l'existence de calcaires phosphatés à *Diatomées* au Sénégal (*C. R. Ac. Sc.*, t. CLI, 1910, p. 108-111).

⁽³⁾ FERNAND JACQUET. — Sur l'âge éocène inférieur des couches phosphatées du Sénégal (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCII, 1936, p. 335-337).

que les phosphates découverts sont sensiblement de même âge que ceux de Tunisie et l'Algérie. De cette même année, date la découverte par F. Jacquet de roches phosphatées sur les deux rives du Sénégal, et dans le lit du fleuve (en particulier à Daoualel). En outre, la falaise mauritanienne du Sénégal lui a fourni une double série phosphatée, comprenant principalement « plusieurs couches phosphatées superposées, d'une puissance totale de 1 mètre à 2 mètres, avec des teneurs en phosphate tricalcique de 40 à 60 p. 100, pouvant atteindre 75 p. 100 »⁽¹⁾. Dans ces dernières années (1935), des phosphates ont été découverts, à de grandes distances de la côte, en plein Sahara soudanais. Au total, ces brèves indications trahissent une grande dispersion des dépôts phosphatés.

Réduits à un petit nombre d'échantillons, mes matériaux d'étude sont originaires de la Mauritanie (A), du Sénégal (B) et du Soudan français (C). Presque tous m'ont été fournis par le Service des Mines de l'Afrique occidentale française.

A. PHOSPHATES DE MAURITANIE.

A ce groupe se rapportent les phosphates de Daoualel (*a*) et ceux de Civé (*b*) que je décrirai successivement.

a. PHOSPHATES DE DAOUALEL.

(Pl. XLVII, fig. 149 et 150; Pl. XLVIII, fig. 151).

J'en ai fait connaître sommairement la constitution dans une note préliminaire publiée en 1910⁽²⁾. Les fragments mis à ma disposition à cette époque sont, les uns, des calcaires à peine phosphatés et, les autres, des phosphates très calcaires, tous caractérisés par une façon d'être spéciale du carbonate de chaux.

Les échantillons reçus du Service des Mines accusent une variété de constitution que ne laissent pas soupçonner les fragments décrits en 1910. A ma connaissance, il existe de ces phosphates trois manières d'être, différentes à plus d'un titre. Et il se peut que le gisement, dont je ne possède qu'un nombre extrêmement restreint de représentants, comporte d'autres variantes.

D'après Louis Baud, ingénieur géologue de la Mission d'études du fleuve Sénégal, les calcaires phosphatés de cette région paraissent s'étendre sur une longueur d'environ 10 kilomètres, avec des teneurs comprises entre 20 et 30 p. 100. Nous verrons bientôt qu'il existe des phosphates d'une teneur beaucoup plus élevée. La totalité des matériaux examinés m'a fourni trois variétés distinctes :

1. *Phosphates à Diatomées, à ciment de calcite rhomboédrique.* — Décrits sous le nom de calcaires phosphatés, en 1910, ils sont de couleur gris clair, et renferment des grains bruns que le micro-

⁽¹⁾ Fernand JACQUET — L'Éocène et les phosphates dans la vallée du fleuve Sénégal (*C. R. Ac. Sc.*, t. 203, 1936, p. 1272-1274).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — *Op. cit.*, p. 108-111. C'est sur les indications de Chudeau qu'à cette date j'ai rapporté au Sénégal les phosphates de Daoualel.

scope permet d'identifier à du phosphate de chaux. Ces grains sont de forme globuleuse, le plus souvent irréguliers, et parfois fragmentaires (fig. 148 et 149, a). Ils ont en très grande majorité, un diamètre inférieur à 1 millimètre; les plus petits atteignent à peine 0 mm. 1, alors que les plus gros mesurent jusqu'à plusieurs millimètres. Tel échantillon les montre très clairsemés; tel autre leur réserve une place prépondérante, tout au moins dans certaines plages. L'absence de préparation mécanique est la règle.

Les matériaux phosphatés sont de teinte jaune paille de différentes nuances, et franchement brunâtre lorsque l'épaisseur des coupes s'accroît un peu. Pas un seul n'exerce la moindre action sur la lumière polarisée, mais il s'en trouve, en faible proportion, qui recèlent des vestiges de calcite rouge. Toute trace de granules de quartz en est complètement exclue. Aux faibles grossissements, la plupart des grains paraissent d'une homogénéité parfaite; les autres, en fort petit nombre, laissent reconnaître de minuscules débris de nature organique. Il en va tout autrement avec des objectifs de puissance moyenne. Dans la presque totalité, on distingue avec netteté des restes de *Diatomées* de taille fort exiguë qui, lors de leur maximum de fréquence, sont empilés les uns sur les autres, en un véritable feutrage constituant, à lui seul, la presque totalité des éléments. Il arrive que des grains en soient pétris dans une partie seulement de leur épaisseur et que le reste en soit privé. Enfin, quelques-uns d'entre eux sont exempts de toute espèce d'inclusions organiques. Parmi les *Diatomées* en question, on reconnaît des *Triceratium*, des *Coscinodiscus*, dont l'état de conservation est parfois des plus satisfaisants. La minéralisation des frustules par le phosphate de chaux paraît être la règle.

Parmi les fragments assez minéralisés pour être qualifiés de phosphates, à proprement parler, j'ai observé de très rares complexes phosphatés, réalisant un type différent de la roche qui les renferme. En l'espèce, les grains phosphatés sont petits, nombreux, et cimentés par du phosphate de chaux. L'absence de produits remaniés, autres que les complexes phosphatés, est à souligner tout spécialement.

Un dernier groupe d'éléments, dignes d'être mentionnés, a pour représentants de rares débris d'ossements, anguleux, de forme allongée, de couleur jaune pâle ou presque incolores, réagissant, suivant la règle, sur la lumière polarisée. Ce sont les seuls débris organiques, observés à l'état libre.

Que la roche se réclame des calcaires ou des phosphates, elle possède un fond de calcite différenciée en rhomboèdres, de petite taille et de forme parfaite. Leur profusion, en même temps que la beauté des cristaux, font douter à première vue de leur nature calcaire, mais des réactions microchimiques et chromatiques ne laissent aucun doute sur leur attribution au carbonate de chaux⁽¹⁾.

Exception faite pour les plus petits, ces cristaux sont pourvus de clivages, généralement peu nombreux, mais susceptibles de se multiplier beaucoup. Dans telle préparation, ils sont simples en majorité (fig. 150); dans telle autre, les individus avec noyau l'emportent de beaucoup (fig. 149). Jusqu'à présent, je n'ai jamais observé, dans une roche donnée de cristaux de calcite aussi variés dans leurs inclusions que ceux des phosphates de Daoualel. De ces inclusions, voici les principales manières d'être :

(1) L. CAYEUX. — Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires (*Mém. Carte Géol. dt. France*, 1916 texte p. 161).

a. Cristaux pourvus d'un rhomboèdre noyau, non moins limpide que son enveloppe, centré, ou rejeté vers la périphérie, et s'éteignant d'un seul coup;

b. Cristaux dont le rhomboèdre noyau, bien qu'orienté sur l'enveloppe, s'éteint lorsque celle-ci est à son maximum de biréfringence;

c. Cristaux dont le rhomboèdre noyau est chargé d'impuretés noirâtres (fig. 150, *b*), au point de réagir très peu sur la lumière polarisée;

d. Cristaux ayant pour noyau un grain de calcite irrégulier, d'aspect rongé, jouissant presque toujours de la même orientation que le rhomboèdre;

e. Par exception, le noyau se résoud en un agrégat de toutes petites particules de calcite.

La préexistence des noyaux aux enveloppes est souvent attestée par des incrustations d'impuretés qui en soulignent le dessin, et, dans certains cas, par des granulations de calcite très exigües, fixées à la surface de rhomboèdres noyaux.

Suivant les plages considérées, les rhomboèdres s'agencent pour constituer, à eux seuls, tout le ciment, sans laisser le moindre vide, ou sont plongés dans une trame de calcite pure indifférenciée.

L'enchaînement des circonstances présidant à la formation de ces rhomboèdres, à noyaux de types variés, m'échappe complètement.

2. *Phosphate quartzeux à ciment de calcite très largement cristallisée* (Pl. XLVIII, fig. 151).

L'échantillon qui doit porter cette étiquette est un phosphate assez riche en grains pour titrer au moins 50 p. 100. Ces grains sont très variés d'aspect, et l'on peut ajouter de taille :

a. Éléments incolores ou très peu teintés, limpides, de forme très arrondie, rappelant ceux de la première variété (*a*);

b. Grains très opaques de couleur brunâtre, comportant le plus souvent une étroite zone marginale, non teintée et indifférenciée (*b*);

Ces deux manières d'être réunissent une très forte majorité d'individus, mesurant en moyenne 0 mm. 2;

c. Matériaux de plus grande taille que les précédents, de faciès très différent, à contours arrondis ou anguleux. Il en est de très limpides, presque incolores et d'autres, en plus grand nombre, de couleurs variées et opaques. Les teintes grises de plusieurs nuances, brunes, noirâtres, etc., sont fréquentes. Leurs caractères ne sont explicables que par une origine épigénique aux dépens de calcaires de plusieurs types. Les plus gros mesurent au moins 1 millimètre.

Des éléments allongés, au nombre de plusieurs dizaines par préparation, revêtent la forme de prismes d'Inocérames, tronqués à une extrémité, ou aux deux bouts. Ils sont phosphatisés, et complètement isotropes, ainsi que tous les matériaux dont il vient d'être question.

Aucun débris organique, calcaire ou siliceux, n'est reconnaissable à l'état libre. Cette règle est presque aussi absolue pour les restes de *Poissons*, dont il existe un seul débris par coupe mince.

Le degré de fréquence des grains de quartz (*c*) est assez grand pour qu'il soit nécessaire d'en faire ressortir la présence en désignant la roche. Tous sont anguleux et de taille généralement uniforme.

A la différence de la première variété, celle-ci possède une gangue de calcite très largement cristallisée, dont chaque élément est susceptible d'enrober plusieurs et même de nombreux grains

de phosphate. Dans l'une des coupes minces, il reste une traînée, très irrégulière de forme, constituée par de la calcite cryptocristalline. J'y vois un témoin de ciment primitif, dont l'intervention peut être tenue pour certaine, en raison de l'écartement des matériaux constituants.

3. *Phosphate congloméré à ciment calcaire, parfois calcaréo-ferrugineux et argileux.* — Roche de couleur grise, consistante, riche en petits globules phosphatés, accompagnés de nodules, dont les plus gros mesurent 0 cm. 5 de plus grand diamètre. Lorsqu'ils sont tronqués par les plans de cassure, ces rognons ont un aspect porcelané.

D'une interprétation parfois malaisée, cette troisième variété tire l'une de ses caractéristiques principales de l'existence et de la fréquence de volumineux complexes remaniés, à des états de minéralisation très différents. Jugeant inutile de passer en revue tous ces complexes, je me borne à en décrire quelques-uns.

a. Élément anguleux, long d'au moins 1 centimètre, composé d'un calcaire cryptocristallin, dont la périphérie est phosphatisée sur une faible épaisseur. Il englobe, outre quelques grains simples de phosphate, une série de complexes de constitution différente. Les plus gros renferment au moins une vingtaine de grains de phosphate et de quartz anguleux, tous cimentés par du phosphate de chaux amorphe. Il y a souvent de telles variantes dans la composition des complexes réunis dans un même élément, qu'ils se réclament indubitablement de plusieurs provenances. Rien n'est plus évident qu'un pareil assemblage résulte d'un double remaniement, l'un, libérant tous les complexes phosphatés, et les transportant dans une vase calcaire très fine, et, l'autre, extrayant du dépôt qui en résulte des morceaux de conglomérat à gangue calcaire.

b. A l'opposé de cette manière d'être répondant au maximum de complication, il existe des minerais à base de phosphate jaune, limpide et pur, emprisonnant des grains de phosphate et de quartz, en nombre très limité, susceptibles de manquer en de grandes plages. Tous sont fissurés ou fracturés, et alors chargés de calcite largement cristallisée, servant de gangue aux fragments. Tels de ces matériaux sont très envahis irrégulièrement par de l'oxyde de fer, qui les rubésie ou les brunit en coupe mince. D'après leur composition on peut tenir pour certain qu'ils ont été empruntés à un dépôt phosphaté, plus riche que les trois variétés analysées.

c. Des complexes, beaucoup moins volumineux, se résolvent en une gangue de calcite, parfois minéralisée par de l'oxyde de fer, englobant des grains de phosphate et de quartz.

Loin d'être des raretés, ces matériaux remaniés occupent parfois la première place dans les préparations. Il est clair que, par suite de leurs différences de constitution, des roches-mères très dissemblables ont été mises à contribution. Et comme toutes sont phosphatées, la probabilité qu'ils résultent d'un remaniement sous-marin est très grande. Une étude s'étendant à de nombreux échantillons s'impose avant de l'affirmer catégoriquement. Du point de vue pratique, la question de savoir s'il reste en place des témoins de la variété la plus phosphatée peut n'être pas dénuée d'intérêt.

Il s'en faut de beaucoup que le phosphate qui enrobe les complexes soit toujours pareil à lui-même. Dans tel échantillon, il est étroitement apparenté à la deuxième variété analysée, avec cette particularité que le ciment de calcite, très largement cristallisé, l'emporte sur les grains phosphatés. Tel autre, de constitution très aberrante, se résoud en un fond de calcaire ancien, partiellement recristallisé et purifié, dont les témoins, de taille quelconque et de forme très irrégulière sont, ou non, minéralisés par du phosphate de chaux amorphe, plus ou moins chargé d'oxyde de fer et généralement très opaque. Les grains de phosphate qui s'y trouvent inclus, parfois en

très grand nombre, sont eux-mêmes fortement pigmentés par le fer oxydé. Des traînées d'argile brune, représentant, au total, une très faible proportion, participent en quelques points à la formation du ciment. Celui-ci, dans toutes ses manières d'être, ne laisse qu'une place insignifiante aux grains de quartz.

Tout dans ce phosphate — gangue et matériaux remaniés — concourt à lui assurer au microscope une physionomie exceptionnelle, dont il est impossible de donner une image très expressive en quelques lignes. La place qu'il réserve aux complexes remaniés, la phosphatisation partielle de la gangue et la concentration de pigments ferrugineux lui assignent une place à part dans le gisement de Daoualel, et, d'une façon plus générale, dans la totalité des phosphates analysés jusqu'à présent.

b. PHOSPHATES DE CIVÉ.

(Pl. XLVIII, fig. 152).

Du rapport technique sur l'activité minière en Afrique occidentale française, en 1937, publié par F. Seyer, ingénieur au Corps des mines, chef du Service des Mines en Afrique occidentale française, j'extrais les données suivantes :

« En 1935, le géologue Jacquet, du Service géologique de l'Afrique Occidentale française, ayant retrouvé et signalé les affleurements de calcaires phosphatés et de phosphate de chaux dans la moyenne vallée du fleuve *Sénégal*, à Civé, au voisinage de Mатаin, la Mission d'études du fleuve *Sénégal* fut chargée de la reconnaissance de ce gisement. Les travaux de prospection ont démontré l'existence de lentilles de phosphate de chaux, presque horizontales, affleurant sur les bords du fleuve et s'étendant au Nord, sous un recouvrement de morts-terrains, sans que les recherches aient permis de connaître avec précision les dimensions de la lentille principale⁽¹⁾. »

Il résulte d'une lettre que m'écrivait Louis Baud, chargé, en 1937, de faire l'étude de détail de la région de Civé, que la Mission d'études du fleuve *Senégal*, dont il faisait partie, a reconnu à Civé quatre couches de phosphate, mesurant respectivement de haut en bas 0 m. 50, 0 m. 10, 0 m. 15, 0 m. 10, séparées par des bancs de schistes, très tendres et très argileux, verdâtres ou brunâtres. Le gisement est intéressant, notamment en raison de sa position à flanc de coteau et en bordure du fleuve *Sénégal*.

La moyenne de deux analyses, après un échantillonnage systématique, sur un lot de 975 tonnes, fait par les soins de l'ingénieur principal des mines Legoux, en 1937, répond aux données suivantes :

P ² O ⁵	22,70 p. 100
CaO.....	30,00 —
SiO ²	24,30 —
Al ² O ³	9,60 —
Fe ² O ³	6,30 —
H ² O combinée.....	4,10 —
Non dotés.....	3,00 —
	100,00 —
P ² O ⁵ 3CaO.....	49,50 p. 100

⁽¹⁾ P. SEYER. — *Rapport sur l'industrie minière 1937. Journal général de l'Afrique Occidentale française*, p. 11 et 12.

Des échantillons plus riches, extraits du même gisement, ont donné une moyenne de 60,80 p. 100 et un maximum de 61,40 p. 100.

L'analyse, reproduite plus haut, assure à ces phosphates une physionomie spéciale, en ce sens qu'ils sont à la fois très siliceux, alumineux et ferrugineux.

Quant aux perspectives de tonnage, fixées en 1937, elles s'élèvent à quelques dizaines de milliers de tonnes de roche phosphatée à 60 p. 100 de phosphate tricalcique.

En l'état de nos connaissances, il s'agit d'une réserve intéressant uniquement l'agriculture régionale.

Pour caractériser ce gisement, je dispose en tout de quatre échantillons, dont deux m'ont été fournis récemment par le Service des Mines de Dakar⁽¹⁾. Tous sont de texture très grossière, d'aspect crayeux, souillés par de l'oxyde de fer et riches en nodules très bien individualisés, susceptibles d'atteindre 1 centimètre de plus grand diamètre, et jamais tronqués sur le bord des échantillons. De nombreux petits éléments les accompagnent. Par leur physionomie générale, les matériaux examinés rappellent beaucoup certains calcaires pisolithiques du Bassin de Paris.

D'une analyse sommaire, il résulte que ces phosphates réalisent un faciès nouveau. Ils réunissent des grains de taille sujette à de grandes variations, dont les plus gros, susceptibles de l'emporter, mesurent jusqu'à 4 millim. 5 de plus grand diamètre, et les plus petits 0 millim. 11. Leur morphologie, elle aussi, est très changeante. Il en est d'arrondis (*a*), de subanguleux et de franchement anguleux (*b*). Par exception, ils sont représentés par des sections elliptiques ou circulaires, qu'on ne peut imaginer plus régulières. Ces matériaux sont teintés en gris de plusieurs nuances. Tous sont dépourvus de limpidité, de différenciation et de réaction sur la lumière polarisée. De même, les inclusions organiques y font toujours défaut, sauf en de rares grains volumineux, où l'on peut observer quelques sections circulaires ou elliptiques, d'attribution impossible, et, dans un seul élément, quelques spicules monoaxes relevant certainement des *Spongiaires*. Abstraction faite de mouchetures et d'arborisations d'oxyde de manganèse, d'origine secondaire, les inclusions minérales en sont complètement exclues. La physionomie des grains fait supposer qu'ils résultent de l'épigénie d'éléments calcaires, à texture fine et de coloration variée. Aucun témoin de leur composition première n'y peut être décelé.

Quelques-uns, parmi les grains les plus volumineux, ont été brisés, en milieu certainement très agité. Aucune trace de classement des matériaux phosphatés ne peut être observée.

L'intervention de complexes remaniés est de règle, mais elle se fait à des échelles très différentes suivant les échantillons. J'ai relevé la présence de gros éléments riches en petits grains phosphatés, de type tout différent de ceux qui gisent à l'état libre dans le voisinage, accompagnés de quelques grains de quartz, le tout cimenté par un phosphate très pur et limpide; puis celle d'éléments composés à base de ciment phosphaté, également d'une grande pureté, isolant un fort petit nombre de grains phosphatés, avec ou sans quartz; et, enfin, l'existence de complexes plus petits, essentiellement formés de grains de phosphate et de quartz.

⁽¹⁾ A la veille de son départ pour une grande tournée saharienne qui devait lui coûter la vie au début d'une carrière, brillante de prouesses, F. Jacquet avait l'intention de me faire envoyer des phosphates du Sénégal, à son retour, et de m'en indiquer les conditions de gisements. Et il m'avait annoncé l'envoi d'échantillons de Mataïn.

Certaines préparations réservent une place importante à une matière grise, amorphe, indifférenciée, ou finement grenue, sans action sur la lumière polarisée, jouant un double rôle : celui de matériaux remaniés nettement individualisés et celui de gangue. Cette association fournit un des témoignages les plus probants, en faveur de la notion de remaniement d'éléments, aux dépens d'un sédiment en cours de dépôt. Cette substance reste indéterminée.

Pas un seul organisme ne figure à l'état libre au milieu des grains, et les restes de tissu osseux, de même que les coprolithes, font complètement défaut.

Aux grains de quartz est dévolu un rôle sujet à de grandes variations. Dans telle préparation, ils comptent par centaines, alors que dans telle autre ils sont des plus clairsemés. Règle générale, leur volume est indépendant de celui des matériaux phosphatés qui les accompagnent. Leurs dimensions sont parfois réduites au point qu'ils constituent une véritable poussière. On peut observer, côte à côte, un grain de quartz mesurant 1 millimètre de plus grand diamètre et un granule ne dépassant pas 0 millim. 05, chiffres correspondant à des diamètres variant dans le rapport de 20 à 1. Quelles qu'en soient les dimensions, les éléments sont en totalité très anguleux.

La gangue normale de ces phosphates est une argile brune (*c*) biréfringente, remplissant entièrement les vides, lorsqu'ils sont petits, et se borne à les tapisser dans le cas contraire. Il arrive que cette matière se borne à revêtir les éléments d'un mince liseré, interrompu à leur contact. De plus, elle s'insinue dans les solutions de continuité des grains et en ressoude les débris, lorsqu'ils ont été fragmentés sur place.

RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS.

Au nombre des particularités de constitution qui méritent d'être rappelées, l'association de phosphates en grains d'origine pélagique et de phosphates grossiers, engendrés en milieu terrigène (Daoualel), est pour le moment unique à ma connaissance. La fréquence et la variété des matériaux phosphatés remaniés, et surtout la présence de nodules qui accusent un double remaniement viennent en première ligne. Dans le domaine envisagé, les témoignages en faveur de la notion de remaniement sous-marin ne manquent pas. La proportion élevée de complexes, beaucoup plus riches que les phosphates qui les emprisonnent, est à souligner tout spécialement. Enfin, le développement à un degré très appréciable de phosphate secondaire, dans le phosphate congloméré de Daoualel est à mentionner, ainsi que l'existence d'une gangue argileuse dans les phosphates grossiers de Civé.

Bien que limitée à un nombre d'échantillons fort restreint, l'étude précédente révèle l'existence de variétés de phosphates foncièrement différentes, en même temps qu'elle fait ressortir celle d'un trait d'union, d'ordre génétique, entre les phosphates nord-africains et ceux de l'Afrique occidentale et équatoriale française. A dire vrai, la transition entre les phosphates des deux régions s'opère uniquement par les phosphates à Diatomées de Daoualel, dont les éléments phosphatés ont pris naissance en milieu pélagique, comme ceux des phosphates du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie. L'étroite parenté des phosphates à Diatomées de Mauritanie avec ceux du Maroc fait supposer qu'une liaison par mer existait, à un moment donné, entre la région de Daoualel et le Maroc méridional. L'hypothèse d'une communication par l'Atlantique bénéficie d'une grande vraisemblance. La série phosphatée mauritanienne est loin de m'être connue suffi-

samment, pour qu'il me soit possible de fixer la part revenant aux matériaux pélagiques dans sa constitution, ainsi que la position qu'occupent ces matériaux dans la succession des dépôts phosphatés. Une chose me paraît des plus probables, c'est que cette formation a dû enregistrer une perturbation d'importance, qui a mis fin à l'arrivée des matériaux pélagiques, et favorisé le développement d'un milieu générateur de phosphates grossiers. En l'état de nos connaissances, c'est à Daoualel qu'on voit inaugurer un régime qui exclut les apports pélagiques de nature phosphatée, régime qui va se développer sans partage, en descendant vers l'Équateur.

B. PHOSPHATES DU SÉNÉGAL.

(Pl. XLVIII, fig. 153-554).

« La série phosphatée, écrit Fernand JACQUET, s'observe au Sénégal principalement dans la presqu'île du Cap-Vert, le Baol méridional, le Ferlo méridional, et dans la basse vallée du fleuve, soit en affleurements, soit le plus souvent en profondeur grâce aux puits. » Le même auteur ajoute : « En réalité, à travers la presqu'île du Cap-Vert, depuis le Crétacé supérieur à *Physaster inflatus* de Dakar, d'une part, et depuis l'Eocène inférieur à *Linthia Delanouei* de Popenguine, d'autre part jusqu'aux calcaires à *Nummulites gisehensis* du Cayor, on observe une série continue où toutes les couches à phosphates sont représentées⁽¹⁾. »

De son étude Fernand Jacquet conclut que « les phosphates du Sénégal se trouvent ainsi être sensiblement du même âge que ceux de Tunisie et d'Algérie. On pourrait même essayer de la paralléliser avec les niveaux phosphatés supérieurs du Maroc, en cherchant l'équivalent des couches à Thersités dans les calcaires scoriacés à Turritelles de Papenguine, d'Alouki, de Niakha et de Cédou-Cébé⁽²⁾. »

Les coupes publiées par F. Jacquet font nettement ressortir le caractère terrigène de la série phosphatée.

La brève description qui va suivre se rapporte exclusivement aux roches phosphatées de la région du Cap-Vert.

ROCHES PHOSPHATÉES DE LA PRESQU'ÎLE DU CAP-VERT.

(CERCLE DE THIÈS).

M. P. Seyer, chef du Service des Mines de l'Afrique occidentale française, a fait connaître, en 1937, le résultat des recherches commencées près du village de Pallo, à l'ouest de Thiès : « Une tranchée et quatre puits ont été creusés, qui tous ont recoupé la couche phosphatée, mais partout celle-ci accusait une teneur en alumine comprise entre 25 et 30 p. 100. Il a fallu renoncer à l'espoir de trouver, à proximité des affleurements, des phosphates peu alumineux et peu calci-

⁽¹⁾ Fernand JACQUET. — Sur l'âge éocène inférieur des couches phosphatées du Sénégal (*C. R. Ac. Sc.*, t. 202, 1936 p. 335).

⁽²⁾ *Ibid.* — *Op. cit.*, p. 336-337.

ques. Mais des phosphates tricalciques riches et assez purs avaient été signalés autrefois à l'est de Thiès, près du village de Fandène. Ils avaient été recueillis dans les déblais d'un puits, dont la profondeur n'excédait pas trente mètres ⁽¹⁾. Des venues d'eau ont arrêté les recherches entreprises pour résoudre la question, qui est à reprendre.

Au point de vue lithologique, les matériaux reçus du Service des Mines correspondent à trois entités distinctes :

- 1° *Silex phosphatés à Globigérines de Sebikatane;*
- 2° *Phosphates grumeleux du Mont Pallo;*
- 3° *Calcaire phosphaté, pétri de débris d'Algues calcaires du Mont Pallo.*

1° SILEX PHOSPHATÉS A GLOBIGÉRINES DE SEBIKATANE.

(Pl. XLVIII, fig. 163).

Roche grise ou gris brunâtre à cassure de silex un peu écailleuse et moins unie que dans les silex typiques, faiblement décolorée sur environ 1 centimètre à la surface. A l'intérieur d'un volumineux échantillon se détache un noyau de teinte plus foncée dont la cassure rappelle davantage celle des silex. A la loupe, on constate que les éléments phosphatés sont sectionnés par les plans de cassure.

Au microscope, ces roches appellent immédiatement l'attention par la fréquence, voire l'abondance des *Globigérines*, silicifiées ou non (a). Ce sont invariablement des coquilles, extrêmement robustes, parfaitement individualisées, et se détachant avec tous les détails de leur microstructure, lorsque le ciment est calcaire. Il en va généralement de même quand les coquilles sont silicifiées et incluses dans une gangue silexifiée, mais il arrive que la silhouette de leurs sections manquent de netteté, ce qui n'empêche pas certains individus d'être fossilisés dans la perfection. C'est en milieu calcaire que les *Globigérines* sont les plus répandues, et très prépondérantes par rapport à l'ensemble des autres éléments. D'autres *Foraminifères*, en proportion infime, font cortège aux *Globigérines*.

Les matériaux phosphatés (b) sont clairsemés dans les coupes minces, surtout dans les plages silexifiées. Ce sont, au tout premier rang, des grains parfaitement arrondis, irréguliers, voire très anguleux et de taille variable; des fragments de tissu osseux peu fréquents et de très rares complexes remaniés. Dans les variétés riches en carbonate de chaux, les éléments phosphatés sont tous colorés en jaune brunâtre, de nuance uniforme, alors que dans les calcaires phosphatés en voie de silicification, ils sont tour à tour teintés en brun ou gris. Ceux qui accusent une coloration brune sont le plus souvent composés d'un volumineux noyau très opaque et d'une mince enveloppe translucide. Règle absolue, ces matériaux sont indépendants des *Globigérines* et autres

⁽¹⁾ M.-P. SEYER. — Rapport sur l'industrie minière, 1937 (*Gouvernement général de l'Afrique occidentale française*, p. 7, et 8).

Foraminifères, dont les loges n'ont jamais concentré la plus petite trace de phosphate de chaux. Les inclusions organiques en paraissent exclues, sauf dans un seul grain, où j'ai reconnu quelques petits bâtonnets rappelant ceux des phosphates nord-africains. Mais à défaut de ces inclusions, on y voit fréquemment de petits rhomboèdres, limpides et surtout minéralisés par de l'oxyde de fer, ainsi que des granulations et taches de la même substance, que la lumière réfléchie permet d'identifier. Au sujet de la nature première de ces rhomboèdres, limpides et surtout minéralisés par de l'oxyde de fer, ainsi que des granulations et taches de la même substance, que la lumière réfléchie permet d'identifier. Au sujet de la nature première de ces rhomboèdres, une seule chose est certaine, c'est qu'ils n'ont pas le faciès des rhomboèdres de sidérite.

Le groupe des Vertébrés a pour représentants des fragments de tissu osseux, de forme irrégulière, souvent très allongée, parfois subrectangulaires en section. La seule différenciation qu'on y puisse observer est une structure zonaire, réservée à des débris très longs. De microstructure caractéristique, il n'y a nulle trace, mais les matériaux de cette catégorie réagissent en totalité sur la lumière polarisée, alors que les grains du groupe précédent sont constitués par du phosphate amorphe.

Autant que j'en puis juger par le nombre restreint des coupes analysées, les complexes phosphatés comptent tout au plus un représentant par section. Le plus intéressant est un débris de minerai de forme arrondie, renfermant une vingtaine de grains phosphatés dans l'épaisseur de la coupe. A la différence du phosphate englobant, il s'y trouve quelques éléments constitués par un *Foraminifère* dont les loges sont pleines de phosphate et un grain pourvu d'une enveloppe hyaline cristalline. Il est à souligner tout particulièrement que ces *Foraminifères* diffèrent de ceux qui sont libres dans le ciment. Et conformément à une règle presque absolue la gangue est tout entière minéralisée. A supposer que la phosphatisation du ciment date du remaniement du complexe, il n'en faut pas moins conclure que le débris a été emprunté à un milieu différent de celui qui a engendré le calcaire phosphaté à *Globigérines*, et, pour tout dire à un phosphate riche. Il n'est donc pas interdit d'escompter l'existence de phosphates de qualité, dans le domaine en question.

Les calcaires phosphatés de Sebkatan, et surtout les types les plus riches en *Globigérines*, contiennent également des matériaux calcaires remaniés, généralement en voie de silicification, englobant ou non des restes de *Foraminifères*. Il en est plusieurs, parmi eux, qui ont subi un commencement de phosphatisation. Formés d'une trame calcaire plus ou moins minéralisée, ils emprisonnent quelques petits grains phosphaté et des restes de *Foraminifères* variés et silicifiés à test généralement mince, distincts de ceux qui appartiennent en propre à la roche. De toute évidence, la roche-mère de ces matériaux diffère beaucoup de celle qui a fourni les complexes bourrés de grains phosphatés, signalés plus haut.

La gangue (c) est, tantôt, au fond de calcédonite cryptocristaline, reproduisant tous les caractères du silex typique, et, tantôt, du calcaire plus ou moins largement cristallisé. Dans l'une comme dans l'autre, mais surtout dans le calcaire peu ou point silicifié, il existe, et parfois en notable proportion, des rhomboèdres réalisant les caractères notés plus haut. Il s'y ajoute également des inclusions ferrugineuses, dont la présence, à la fois dans les *Foraminifères*, les grains phosphatés et la gangue, plaide en faveur d'une genèse *in situ*.

Quoique plutôt grossière, la roche est toujours privée de quartz clastique.

2° PHOSPHATES GRUMELEUX DU MONT PALLO.

(Pl. XLVIII, fig. 154 et 155).

Les deux échantillons que je possède réalisent un type très aberrant et unique dans la collection pourtant des plus variées passée en revue. L'un d'eux se présente à l'œil nu teinté en gris jaunâtre, et, par places, taché de bleu turquoise très pâle. Suivant les fonds, l'aspect est homogène, bréchoïde et concrétionné. L'autre est une roche grise, poreuse, riche en petits vides, rugueuse au toucher, et d'aspect un peu finement scoriacé.

J'ai qualifié ces phosphates de grumeleux, non en raison de leurs caractères macroscopiques, mais par suite de la constitution des coupes minces qui en ont été tirées. Ce sont les uns et les autres des phosphates d'aspect grossier, comportant l'existence de plusieurs sortes de matériaux, et répondant à deux variétés.

A. (Fig. 154). Le fond se résout en petits nodules, composés de phosphate amorphe et indifférencié (*a*) de forme générale arrondie ou subanguleuse, teintés en jaune paille quelque peu foncé ou en brun, et toujours nettement individualisés. Les plus gros observés dans mes préparations mesurent près d'un centimètre. Tous remaniés, ces matériaux peuvent être criblés de petites cavités irrégulières (*b*) souvent très anguleuses, marquant certainement l'emplacement d'inclusions détruites par dissolution. De ces inclusions, il ne subsiste pas le plus petit témoin.

Ces nodules sont revêtus d'une couronne d'épaisseur très variable (*c*), même pour un élément donné, constituée par une autre variété de phosphate, de couleur très foncée et opaque; d'apparence souvent concrétionnée, et, sans aucun doute, développée sur place. Des protubérances de cette couronne pénètrent plus ou moins profondément dans la gangue. Et de plus, le même phosphate engendre dans le ciment des perles irrégulières (*a*) de taille généralement petites, isolées, voire coalescentes, dont les dimensions varient de 0 millim. 02 à 0 millim. 9. Le phosphate réalisant ce faciès résulte évidemment d'une seconde génération d'importance, développée *in situ*.

A ces matériaux phosphatés s'ajoutent des morceaux d'une roche siliceuse, se détachant en gris blanc dans les sections. De taille comparable à celle des rognons phosphatés, et parfois plus volumineux, ces débris peuvent être, eux aussi, criblés de vides, pareils en tous points à ceux qui ont été observés dans les rognons phosphatés. Avec un grossissement d'environ 60 diamètres, on y discerne l'existence d'une structure finement concrétionnée et des morceaux de test très minces, dérivant de *Foraminifères*, tous indéterminables. Des sections circulaires ou elliptiques, revêtant parfois une certaine fréquence, ne se prêtent pas davantage à l'identification. Entre les nicols croisés, le fond se révèle amorphe avec quelques très petits points réagissant sur la lumière polarisée.

Les grains de quartz isolés dans le ciment sont rares et de taille très variable.

La roche, qui est poreuse par les vides des petits nodules phosphatés et des matériaux siliceux, l'est également par sa gangue. Composé de silice cryptocristalline se rapportant à la calcédonite (*e*), le ciment se borne à tapisser les vides, quelquefois très grands, séparant les éléments analysés, d'une large zone de calcédonite cryptocristalline, concrétionné et teintée en gris. Cette même matière s'insinue dans les solutions de continuité des rognons phosphatés, sous la forme de veinules de taille variable.

B 2° (fig. 155). — La seconde manière d'être du phosphate de chaux en fait un produit homogène, indifférencié, de couleur brunâtre, développé à dose massive sur la plus grande partie d'une préparation, ou fixé à la surface de rognons à la façon d'incrustations d'épaisseur variable, comme dans le premier type. Dans le prolongement des aunes, la matière est convertie en nombreux grumeaux (*a*), presque contigus ou coalescents, de diamètre variable, dans lesquels il faut voir de véritables petites concrétions, indubitablement développées sur place. Dans tous les cas, le phosphate est privé d'inclusions et optiquement amorphe. L'absence de témoins calcaires est absolue.

Le milieu contient également, en nombre limité, des rognons de même type que ceux de la première variété, c'est-à-dire phosphatés (*b*) ou siliceux, les uns et les autres susceptibles d'être criblés de vides.

En l'espèce, le phosphate du second temps, qui enrobe les rognons du minerai précédent, constitue le fond de la roche, de telle sorte qu'il l'emporte, et de beaucoup, sur celui du premier temps, exemple unique à ma connaissance.

En réalité, l'histoire de ces phosphates reste fort incertaine sur plus d'un point essentiel. En particulier, l'origine des vides qui criblent une partie des matériaux phosphatés et siliceux est quelque peu mystérieuse. Les faits sont tels qu'elle est forcément postérieure à la phosphatisation et à la silicification des matériaux, circonstance qui exclut l'intervention du carbonate de chaux pour les remplir. D'autre part, la morphologie des vides n'est d'aucun secours pour fixer la nature du produit disparu. L'étude de nombreux spécimens peut seule fournir les éléments d'information nécessaires pour résoudre la question.

En ce qui concerne le milieu générateur du gisement, tel qu'il se présente actuellement, on est logiquement conduit à se demander, à la lumière des observations relevées au microscope, s'il ne résulte pas, à tout le moins en partie, d'un phénomène de remise en mouvement, rappelant, à l'échelle près, celui qui a laissé une profonde empreinte sur les phosphates de la Caroline du Sud et de la Floride. Dans cette hypothèse, la prédominance du phosphate du second temps se conçoit facilement. Les phénomènes de dissolution enregistrés par les phosphates en question sont loin de s'opposer à cette orientation.

3° CALCAIRE PHOSPHATÉ PÊTRI DE DÉBRIS D'ALGUES CALCAIRES DU MONT PALLO.

De teinte gris jaunâtre et dure, la roche, qualifiée de calcaire phosphaté, ne contient que d'insignifiantes traces de minéralisation, à l'état d'éléments informes, constitués par du phosphate amorphe.

Dans sa presque totalité, il s'agit d'une roche à pâte très fine, remplie de débris organiques de nature calcaire, dont les parties pleines sont converties en calcite plus ou moins largement cristallisée. On y reconnaît, en très grand nombre, des tubes cylindriques ou cylindro-coniques, percés de petits pores polygonaux extrêmement rapprochés, comportant une foule de sections transversales, rigoureusement circulaires ou un peu elliptiques. Par exception, le diamètre du canal axial est fort réduit, alors qu'en général il est très développé. Le diagnostic de ces tubes cylindriques à structure poreuse ne laisse place à aucun doute, ce sont des *Algues calcaires siphonnées*. Ces orga-

nismes sont accompagnés de formes variées, irrégulières, de grande fréquence, pourvues d'un réseau cellulaire très fin, rentrant également dans le groupe des Algues.

En compagnie de ces Algues, on observe, en proportion élevée, des débris d'organismes également calcaires, de taille parfois très grande, à texture pleine, dont la morphologie n'est en rien révélatrice de leur identité. A de rares exceptions près, la fossilisation en a fait des agrégats de calcite, qui n'ont pas laissé subsister la plus petite trace de microstructure. Les exceptions auxquelles je fais allusion ont gardé une structure finement feuilletée, qu'on est tenté de rapporter à des restes de Mollusques, mais qui peuvent dériver de restes de Crustacés, ainsi que nous l'apprendrons bientôt.

Quelques *Globigérines* complètent la collection des restes organiques.

Les minéraux détritiques ne comptent pas un seul représentant dans les préparations.

CONCLUSIONS.

Les trois types de roches passés en revue sont tellement dissemblables que selon toutes probabilités, une étude, fondée sur un grand nombre de matériaux mettrait en évidence l'existence d'une grande variété de types plus au moins phosphatés. Ils diffèrent à la fois de toutes les modalités dont il a été question jusqu'à présent, et, en particulier, de celles des phosphates de Mauritanie. Il en est ainsi parce que leur milieu générateur est tributaire des sédiments terrigènes, susceptibles de varier à l'infini.

De cette brève analyse, retenons principalement :

- A. L'indépendance des *Foraminifères* et des éléments phosphatés en présence;
- B. L'existence de complexes remaniés, empruntés à des phosphates notablement plus riches que les échantillons analysés, particularité déjà illustrée par beaucoup d'exemples;
- C. Le facies aberrant des phosphates grumeleux du Mont Pallo;
- D. Et principalement le rôle prépondérant des phosphates du second temps dans le gisement du Mont Pallo, dont le grand développement paraît impliquer l'intervention d'un phénomène de remaniement chimique du phosphate de chaux, sous l'influence d'actions continentales.

C. PHOSPHATES DU SOUDAN FRANÇAIS.

J'ai en ma possession deux groupes d'échantillons originaires du Soudan français : 1° un ensemble de matériaux, en provenance de Tamaguillel (In Tassit), prélevés dans un gisement découvert en 1935, situé au Nord de la boucle du Niger, dans la vallée du Telemsi, sur le passage du futur transsaharien. J'en suis redevable au Service des Mines de l'Afrique équatoriale française; 2° un fragment de conglomérat, étiqueté « bon bed éocène », originaire de Tebakalet, près d'Asselar, qui m'a été envoyé par l'explorateur Th. Monod, professeur au Muséum d'Histoire naturelle. De l'examen des uns et des autres, tant à l'œil nu qu'au microscope, on peut conclure avec certitude qu'ils ont été extraits d'une seule et même formation, douée d'une notable extension dans la direction Nord-Sud.

1° PHOSPHATES DE TAMAGUILLEL (IN TASSIT).

Si j'en juge par les spécimens soumis à mon examen, le phosphate de Tamaguillel affecte le faciès de gravier, meuble et par exception consolidé, réunissant des éléments de taille très variable, depuis des nodules de 15 millimètres de plus grand axe jusqu'à un produit sableux très fin. Parmi les rognons, il en est de forme globuleuse, ovoïde, ellipsoïdale, qui sont associés à des éléments subanguleux, voire très irréguliers. Quelques-uns réalisent le caractère de sphères ou d'ellipsoïdes qu'on ne peut imaginer plus réguliers. Tous sont de teinte brunâtre plus ou moins foncée, et luisants comme s'ils avaient été polis.

Des coprolithes, faciles à identifier à l'œil nu, y revêtent une certaine fréquence. Les uns sont cylindriques, rectilignes ou un peu arqués, avec ou sans étranglements transversaux. Moins réguliers de forme, les autres sont ventrus ou rétrécis aux extrémités. Les plus longs dépassent de peu 1 cm. 5. Quelques-uns sont brisés. Des débris d'ossements de Reptiles leur sont associés. L'un d'eux se signale par des perforations cylindriques.

J'ignore si, tel qu'il est, l'échantillon reçu représente le tout-venant du gisement, et je ne sais pas davantage si celui-ci est puissant et de grande extension.

J. Piveteau⁽¹⁾ qui a bien voulu étudier les fossiles qui faisaient partie de l'envoi les a répartis en deux séries :

1° Un ensemble se rapportant au Tertiaire inférieur, comprenant des Invertébrés « et peut-être un Crocodilien à longue symphise mandibulaire » ;

2° « Des formes quaternaires ou récentes, représentées par des restes de Poissons (vertèbres, épines, etc.), appartenant à la famille des Siluridés ».

Les Invertébrés comprennent *Nautilus Molli*, *Pseudoheligmus nigeriensis*, *Plicatula* sp., *Ostrea Chudeani*, *Venericardia* sp. et un Echinide, *Brissoïdes* nov. sp. Et J. Piveteau de conclure de son examen que « L'âge éocène inférieur de cette faune paraît indiscutable. Des formes comme *Nautilus Molli*, *Pseudoheligmus ingeriensis*, sont associées au Soudan, avec *Operculina canalifera* qui caractérise l'Eocène inférieur ».

Au microscope, les nodules analysés, sont représentés par de nombreuses sections subcirculaires prédominantes, le plus souvent très rapprochées, ou contiguës, dont le diamètre le plus fréquent est de 1 cm. 5. Aucun classement n'est perceptible, et l'on peut observer des grains mesurant une très petite fraction de millimètre à côté des plus volumineux.

Abstraction faite des restes de Vertébrés, dont il sera bientôt question, on peut dire que chaque élément correspond invariablement à une entité absolument différente des grains de phosphate du Nord de l'Afrique. Il se résout en un phosphate amorphe, limpide, par lui-même non teinté et jamais différencié, mais presque toujours envahi à des degrés fort divers par de l'hydroxyde de fer, susceptible d'en faire varier l'aspect à l'infini. Cette substance joue le rôle d'un voile extrêmement léger, et surtout de pigment concentré en mouchetures, taches, traînées, traits allongés, rares globules, etc. Enfin, elle se ramasse à la périphérie des éléments, sous forme de

⁽¹⁾ Je prie M. Piveteau d'agréer, mes bien vifs remerciements.

couronne épaisse, mal individualisée, avec ou sans amorce de structure concentrique plutôt vague. Les grains peuvent également être souillés par des matières organiques chargées d'oxyde de fer. Tel est le cas pour des concentrations de forme arquée, parfois ramifiées et entrecroisées, engendrant de curieux réseaux.

La présence d'organismes en inclusions est certaine, mais rares sont les éléments qui permettent d'en constater l'existence sans réserves.

Plusieurs grains renferment des spicules de *Spongiaires*, fossilisés par de l'oxyde de fer hydraté. Ce sont des spicules cylindriques, coniques et fusiformes de grande taille et des spicules de *Tetractinellidae* ou de *Lithistidae*, réunissant le plus souvent deux et très rarement trois tronçons de rayons. Aucune forme complète n'a été observée.

Un débris assez grossier et très fruste me paraît appartenir à un *Foraminifère* à test épais, mal conservé, minéralisé par de l'oxyde de fer.

Quelques grains renferment des sections circulaires ou elliptiques, toujours vides, circonscrites par un test hyalin, indifférencié, amorphe et non perforé, et de nature indéterminée.

A ces grains qui ne réagissent jamais sur la lumière polarisée, s'ajoutent des restes de tissu osseux, usés et généralement arrondis, de merveilleuse conservation quand l'oxyde de fer en souligne la microstructure en comblant tous les vides, si petits soient-ils. Le degré de fréquence en est toujours trop faible pour que la roche puisse être classée comme brèche osseuse proprement dite.

Le quartz est à peu près complètement exclu du dépôt consolidé.

Quant au ciment de l'unique échantillon de phosphate cohérent analysé, il est constitué par de l'oxyde de fer hydraté plus ou moins opaque, comblant seulement une partie des vides.

La multiplication des sections de nodules libres ferait certainement ressortir quelque variété dans la constitution des éléments. L'un d'eux se résoud en globules, représentés en coupes par des formes pleines, circulaires, elliptiques et parfois un peu irrégulières, mesurant pour la plupart 0 millim. 2 à 0 millim. 6. D'origine indéterminée, ces globules sont formés d'une matière phosphatée, incolore, isotrope, plus ou moins chargée de fines particules, d'origine probablement organique, qui lui communiquent une grande opacité quand elles abondent. Quelques complexes représentent des morceaux remaniés de la même roche globuleuse. Les globules sont d'une fréquence telle qu'une place très faible est réservée à la gangue. Celle-ci est, soit ferrugineuse, soit composée d'une matière incolore isotrope, probablement de même nature que celle des globules.

Des coupes longitudinales et transversales de coprolithes subcylindriques affichent une constitution très simple. Elles se décomposent en un fond incolore, isotrope, surchargé de matières organiques qui en rendent l'étude malaisée. Le plus souvent ces matières sont très finement granuleuses, mais il arrive qu'elles forment des mouchetures, des taches informes et que, par exception, elles se concentrent en des sortes de traits nettement individualisés. De rares fragments anguleux de tissu osseux peuvent y figurer. Les types de coprolithes que j'ai qualifiés de typiques dans les phosphates en grains du Nord de l'Afrique ne comptent, à ma connaissance, aucun représentant.

2° PHOSPHATES DE TEBAKALET, PRÈS D'ASSELAR.

Le seul échantillon que j'en possède est un phosphate cohérent d'aspect très ferrugineux, d'affinités trop étroites avec ceux qui viennent d'être caractérisés pour qu'il ne soit pas superflu de les décrire en détail. Les matériaux phosphatés ne diffèrent par rien d'essentiel de ceux qui viennent d'être analysés. En gros, les dimensions sont les mêmes et l'oxyde de fer intervient dans leur constitution de la même façon. Des produits organiques y figurent avec plus de fréquence, et il arrive qu'en se concentrant ils donnent naissance à des différenciations inconnues dans le phosphate de Tamaguillel étudié. C'est ainsi que ces matières peuvent dessiner des pseudoolithes mal conformées, etc. Plusieurs éléments se réclament des coprolithes.

Les inclusions organiques y sont à la fois plus variées et plus nombreuses. D'une fréquence plus grande, les spicules de *Spongiaires*, également minéralisés par l'oxyde de fer, ne fournissent aucune donnée nouvelle.

Le fait le plus intéressant dans cet ordre d'idées est la présence dans plusieurs individus, et dans chaque coupe, de restes organiques qui me paraissent rentrer dans le groupe des *Algues*. Ce sont, dans le cas de beaucoup le plus simple, et en section des sortes de rubans, rarement rectilignes, le plus souvent arqués, faiblement ondulés, de largeur à peu près constante pour un individu ou effilés aux extrémités. Tel d'entre eux mesure 0 millim. 3 de long et 0 millim. 05 de large; tel autre, 1 millimètre de long et 0 millim. 09 de plus grande largeur. Les traits qui les limitent ne sont jamais rectilignes, mais irréguliers dans le détail. Tous possèdent un canal axial que souligne souvent l'oxyde de fer, la masse du thalle se détachant sans trace de coloration et avec une grande limpidité. Dans l'ensemble, les complications morphologiques abondent : repli ou épanouissement d'une extrémité, individus composés de deux parties disposées presque à angle droit ou se bifurquant, formes courtes, d'épaisseur changeant d'un point à l'autre, revêtant un aspect mamelonné, etc., et toujours avec le même mode de fossilisation. Bref, une étude quelque peu approfondie des phosphates de Tabakalet serait pour un algologiste une source de matériaux très variés.

Les rognons phosphatés retiennent également l'attention par l'existence dans chaque préparation de plusieurs éléments riches, soit en vides, de section circulaire, elliptique ou un peu irrégulière, soit en corpuscules incolores, homogènes dans toute leur épaisseur et sans action sur la lumière polarisée. Des grains en sont formés pour un tiers. Je suis dans l'ignorance la plus complète en ce qui les concerne.

Les restes de tissu osseux se sont beaucoup multipliés, particularité qui marche de pair avec une plus grande fréquence des coprolithes.

Le quartz détritique est un peu moins rare que dans les échantillons de Tamaguillel, mais c'est encore un élément d'importance négligeable.

Quant au ciment, il est presque en totalité composé de fer hydroxydé, très opaque, auquel s'ajoute, dans quelques intervalles libres entre les grains, du quartz microgrenu d'origine secondaire.

CONCLUSIONS.

Les enseignements qu'on peut légitimement tirer de la brève analyse des phosphates recueillis au Nord de la boucle du Niger sont malheureusement limités en nombre et en qualité, par suite de l'insuffisance des matériaux analysés et de mon ignorance absolue de leurs conditions de gisement. Nous pouvons retenir que les phosphates étudiés rentrent dans la catégorie des dépôts très grossiers, affectant le faciès de graviers et de conglomérats, toujours chargés de restes de Vertébrés, dont quelques éléments renferment des Algues susceptibles d'être nombreuses.

N'était un seul et unique débris de conservation très défectueuse, observé dans le phosphate de Tamaguillel, qu'on pourrait conclure, en toute certitude, à l'absence complète de traces de calcaire dans le dépôt. Rien n'en fait supposer l'existence à l'origine dans les matériaux phosphatés, si bien qu'il est impossible d'en fixer la composition première et les phases de leur évolution. Par voie de conséquence, la nature du milieu générateur nous échappe.

Si l'existence du carbonate de chaux reste hypothétique, en revanche celle de la silice est certaine, mais comme il arrive souvent cette silice a émigré en totalité sans que sa destinée nous soit connue.

Il résulte de l'état actuel de nos connaissances que des conditions plus ou moins favorables à la genèse des phosphates ont été réalisées, très loin à l'intérieur du continent africain, dans les prolongements des gisements de Mauritanie et du Sénégal, sensiblement sur le même parallèle et à la même époque. Il ne s'ensuit pas qu'il y ait une certaine parenté entre les gisements de part et d'autre. Abstraction faite du caractère grossier des dépôts du Soudan, l'histoire des grains diffère de part et d'autre sur plus d'un point fondamental. Et ces différences portent, à la fois, sur la constitution organique et sur le milieu générateur. En l'espèce, pas de phénomènes de remaniement sous-marin et pas de phosphate de seconde génération. Jusqu'à plus ample informé, il est permis de conclure à l'indépendance des deux séries de dépôts, et à l'existence d'une entité appartenant en propre au domaine du moyen Niger.

CONCLUSIONS RELATIVES AUX PHOSPHATES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE FRANÇAISE.

On ne saurait s'étonner de constater d'importantes différences entre les phosphates distribués dans un immense domaine, tel que l'A. O. F. Nous avons appris à quel point les phosphates diffèrent entre eux en Mauritanie et au Sénégal. Dès qu'on fait entrer en ligne de compte ceux du Soudan, les contrastes s'accroissent beaucoup. Aussi la notion d'un vaste et unique bassin générateur s'étendant sur toute la région envisagée est-elle en pleine contradiction avec les faits. Dans l'Ouest, à proximité de l'Atlantique, les phosphates ont pris naissance, pour une faible part, en milieu *pélagique*. Tous les autres, auxquels s'ajoutent ceux du Soudan, sont par excellence des dépôts *terrigènes*, et conséquemment sujets à des variations qui peuvent être grandes.

L'image de deux provinces indépendantes qu'on peut être tenté de dégager de ces données ne répond même pas à la vérité, car les phosphates grossiers de Mauritanie et du Sénégal, d'une part, et ceux du Soudan, d'autre part, ont été engendrés dans des conditions extrêmement différentes. Aussi faut-il admettre l'existence en A. O. F. d'au moins trois provinces génératrices

de phosphates datant de l'Éocène inférieur. Il nous reste tout à apprendre pour délimiter chacune d'elles et en écrire l'histoire.

2° PHOSPHATES DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE.

Je suis redevable au Service des Mines de l'Afrique équatoriale française de deux séries de phosphates, l'une réduite à quelques échantillons originaires du Gabon, et l'autre, plus importante, prélevée dans la région côtière du Moyen-Congo. Outre ces matériaux, j'ai pu étudier un phosphate du Gabon, recueilli par R. Furon.

A. PHOSPHATES DU GABON.

Le Service des Mines du Gouvernement général de l'Afrique équatoriale française m'a fourni en 1936, quatre échantillons de roches phosphatées, recueillis par la Mission pétrolifère dans la région immédiatement côtière, entre Port-Gentil et Nenghé-Sika. Deux d'entre eux ont été prélevés par Haas, en 1934, à M'Pando (sur la côte, à la hauteur de Fernan-Vaz, à un kilomètre au Nord de l'ancien village Namino), et les deux autres, un peu au sud des précédents, sur la lagune d'Iguéla, au débarcadère de l'exploitation Janvier (sur la côte nord).

De la même région, et plus exactement de la pointe Sainte-Catherine, R. Furon a rapporté, en 1932, des matériaux étroitement apparentés à une partie de ceux qui m'ont été remis par le Service des Mines. Il résulte de son étude stratigraphique du gisement que la formation phosphatée est subordonnée au Sénonien transgressif⁽¹⁾. Pour plus de précision, notons qu'elle est comprise entre des grès fins d'âge santonien et le Maëstrichtien-Danien à *Venericardia Beaumonti* et qu'elle renferme *Gyroïdina depressa*.

D'après R. Furon, la plus grande partie du gisement s'étend sous la mer. Des écueils, visibles à quelques dizaines de mètres de la plage, sont constitués par des roches phosphatées que la mer transforme en nombreux galets. D'une épaisseur qui n'excède pas 5 à 10 centimètres, les couches phosphatées sont intercalées dans une série de roches silicifiées. R. Furon y a reconnu de nombreux restes organiques, comprenant quelques *Radiolaires*, des *Globigérines*, un grand nombre de *Rotalia*, des débris d'*Echinides* et une très notable proportion de restes de *Vertébrés* (fragments de tissu osseux et dents de *Poissons*). Le phosphate de chaux existe non seulement sous la forme organique, mais à l'état de nodules de petite taille (grains) dans lesquels R. Furon voit des matériaux remaniés dont «la roche-mère paraît être la roche phosphatée se trouvant au-dessous des lits phosphatés». Imprégné de calcédonite secondaire, le ciment est voilé par un peu de phosphate de chaux jaunâtre.

⁽¹⁾ Raymond FURON. — Les roches phosphatées de la Côte du Gabon (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXCIV, 1932, p. 1959-1960).

Ibid. — Observations géologiques sur la Côte du Gabon (A. E. F.) [*Les roches phosphatées*, *B. S. G. Fr.*, 5° s., t. II, 1932, p. 505-511, pl. LXXX].

De son étude, l'auteur conclut à l'existence d'un lien entre la formation de la couche phosphatée et une rupture d'équilibre.

Les quelques pages, réservées à l'analyse des phosphates du Gabon, seront en majeure partie consacrées à l'étude des quatre échantillons du Service des Mines de l'A. O. F. J'en compléterai le diagnostic par une brève description du phosphate prélevé par R. Furon.

ROCHES PHOSPHATÉES DE M'PANDO.

(Pl. XLIX, fig. 156).

Elles se rapportent à deux variétés très différentes : l'une est un phosphate proprement dit, silicifié; l'autre est un calcaire très faiblement phosphaté et silicifié.

PHOSPHATE SILICIFIÉ (fig. 156). — Roche grise, grenue, d'aspect très siliceux, à cassure tranchante. De constitution très simple, elle est essentiellement composée d'éléments phosphatés, extrêmement pauvre en restes organiques, et pourvue d'un ciment exclusivement siliceux.

Les matériaux phosphatés, assez répandus pour se toucher le plus souvent, réalisent la forme de grains, généralement lumineux (0 millim 1 - 3 millim). à contours presque toujours arrondis (*a*) et, parfois subanguleux (*b*). Les plus globuleux comptent parmi les moins gros. Règle, souffrant peu d'exceptions, le phosphate est pur et limpide, et dans toutes ses manières d'être, il est monoréfringent. En fait d'inclusions, il contient de très rares petits grains de quartz clastique, des restes organiques et de la silice secondaire (*c*). Aux inclusions organiques, je ne puis rapporter qu'une dizaine de sections arrondies, ou faiblement elliptiques, de fort petite taille, pourvues ou non d'une mince enveloppe, sans structure caractéristique, et remplies de silice cryptocristalline. Leur nature est indéterminée. Un seul élément renferme dans toute l'épaisseur de sa coupe de fines tubulures superposées, d'affinités également inconnues. De petites inclusions de calcédonite s'observent dans un grand nombre de grains, et parfois en proportions notables. Il s'agit, croyons-nous, d'un résidu de carbonate de chaux, silicifié sur place en même temps que la gangue.

Les débris organiques, observés à l'état libre, comptent plusieurs fragments de tissu osseux et un morceau de carapace de *Crustacé*, nettement caractérisé par une microstructure typique.

La gangue se résout en une association intime de calcédonite cryptocristalline et d'opale individualisée en minuscules sphérules indifférenciées, libres et le plus souvent coalescentes, voire fondues les unes dans les autres. Quelques dizaines de grains de quartz y sont inclus (*e*). L'absence d'organismes siliceux est d'autant plus à souligner que la silice secondaire est plus développée. L'origine de celle-ci reste à fixer. On ne manquera pas de remarquer l'exclusion complète de toute trace de calcite.

Il s'agit, comme on le voit, d'une constitution très simple. Sauf qu'ils sont rarement quartzeux et qu'ils le sont faiblement, les matériaux phosphatés ont avec ceux du Moyen-Congo, dont il sera bientôt question, un air de famille très prononcé.

Calcaire à Foraminifères, très silicifié et faiblement phosphaté. — Toute différente de la précédente, la seconde roche ne renferme de phosphate qu'à un degré presque négligeable. Malgré la pré-

sence d'organismes susceptibles de le concentrer, il est individualisé en grains indépendants, de forme quelconque, et toujours privés d'inclusions tant minérales qu'organiques.

Le groupe des *Foraminifères*, qui représente presque à lui seul toute la contribution organique, compte de nombreux restes complets ou fragmentaires. Pierre Marie, qui a bien voulu en faire l'examen, y a reconnu

Arbulina sp.

Globigerina sp et *G.* aff. *cretacea* d'Orb.

Gümbelina sp.

Bolivina ou *Bolivinella* sp.

Gyroidina aff. *Michelini* d'Orb.

Nodosinella sp⁽¹⁾.

De l'examen de cette faune, P. Marie conclut que le dépôt paraît se réclamer du Santonien ou du Campanien inférieur⁽²⁾.

Les grains de quartz sont rares et petits.

Le fond de la roche est formé de calcédonite cryptocristalline, associée à de nombreux témoins de calcaire corrodés.

Les préparations attirent l'attention, de prime abord, par une orientation commune à la totalité des matériaux, qui sont stratifiés. Cette structure est, sans doute possible, pour le moins originelle, en majeure partie.

ROCHES PHOSPHATÉES DE LA LAGUNE IGUELA.

(Pl. XLIX, fig. 157 et 158).

Les deux spécimens que j'en possède correspondent également à deux manières d'être foncièrement différentes.

Phosphate silicifié à Foraminifères. — Le faciès de cette roche n'a pas son pareil parmi les nombreux types de l'Afrique équatoriale française analysés jusqu'à présent. Elle tire sa caractéristique, et de l'existence de *Foraminifères* inconnus dans tous les phosphates étudiés et des phénomènes de silicification qui affectent à la fois les *Foraminifères* et la gangue.

A l'état de grains (fig. 157 et 158 a), le phosphate de chaux est relégué au second plan, bien après les *Foraminifères*. Il donne naissance à des éléments à contours souvent quelconques, généralement volumineux, constitués par du phosphate, pur ou souillé, d'impuretés très nombreuses. Aucune inclusion minérale ou organique n'y figure.

⁽¹⁾ La collection des *Foraminifères* comprend, notamment, des coquilles très allongées et déformées dans lesquelles il a identifié des formes « toujours grises et troubles, caractère qu'on retrouve chez les *Foraminifères* agglutinants; elles paraissent composées de loges groupées les unes à la suite des autres sur un axe droit, mais un examen plus attentif montre qu'elles sont presque toutes dissymétriques. Ce sont toutes des sections déformées par compression, mais rarement brisées. Certaines d'entre elles rappellent des sections de *Reophax* ». Tout bien pesé, P. Marie estime que lesdites sections doivent être rapportées au genre *Nodosinella*, qui est plutôt silico-chitineux que franchement agglutinant »

⁽²⁾ Lettre de Pierre Marie à l'auteur.

Tout l'intérêt du dépôt réside dans les *Foraminifères*. Ce sont, pour la presque totalité, des *Cristellaria*, pourvus d'une coquille extrêmement trapue, représentés, notamment, par une grande fréquence de sections lenticulaires très typiques. Le mode de fossilisation de ces organismes est sujet à de nombreuses variantes.

1° De très rares individus ont conservé une coquille partiellement calcaire, très discernable entre les nicols croisés;

2° Le test qui est calcédonieux, à peu d'exceptions près, n'est bien individualisé qu'en deux cas, impliquant le remplissage des loges, soit par du phosphate de chaux, jaunâtre, limpide, et toujours indifférencié (fig. 157 et 158, *b*), soit par de l'opale, non découpée en globules;

3° De nombreuses manières d'être résultent de la différenciation partielle ou totale de l'opale en sphérules, libres ou plus ou moins soudées;

4° Par raréfaction progressive de l'opale des loges, celles-ci sont de plus en plus envahies par de la calcédonite cryptocristalline, en tous points pareille à celle qui épigénise les coquilles. Finalement, le Foraminifère entier, loges et test compris, est transformé en un nid de calcédonite, reproduisant les caractères morphologiques des individus (fig. 157, *c*).

Les restes de tissu osseux, à structure conservée ou non, sont au nombre de plusieurs dizaines par coupe mince. La plupart dessinent en section de longues bandelettes rectangulaires, ornées ou non de pseudo-clivages longitudinaux, réagissant toutes sur la lumière polarisée à la façon de l'apatite. Leur présence introduit beaucoup de variété dans les coupes. Il s'y ajoute des coprolithes typiques, à raison d'un élément de grande taille par section. Aux Crustacés, je ne puis rapporter qu'un seul fragment bien caractérisé.

Les minéraux détritiques ne comptent, à ma connaissance, qu'une dizaine de grains anguleux de quartz, par préparation.

La gangue contribue, elle aussi, à diversifier la physionomie des coupes. Toutes les transitions existent entre les plages d'opale indifférenciée et celles qui sont exclusivement calcédonieuses. Le passage se fait par la transformation progressive de l'opale massive en opale globulaire, associée à de la calcédonite (fig. 157 *d* et fig. 158 *c*.) qui se développe de plus en plus aux dépens de la silice monoréfringente, et finit par la remplacer en totalité. Des plages, dont les Foraminifères, remplis de calcédonite, sont inclus dans une gangue où ce minéral prédomine, acquièrent une microstructure de silex. De loin en loin, un peu de quartz secondaire, en tout petits éléments, s'isole au sein de la calcédonite.

La contiguïté des matériaux phosphatés et de l'opale indifférenciée ne prête à aucune difficulté de diagnostic, notamment, par suite de leur différence de coloration et de relief. En général, le phosphate de chaux est teinté en gris jaunâtre, ou en jaune paille, alors que l'opale se pare de tons gris.

En somme, dans cette roche, douée d'une physionomie propre, le phosphate existe en grains, en remplissage de loges de Foraminifères, où il joue le rôle de produit épigénique d'une vase de nature calcaire, et, accessoirement, sous forme de débris organiques.

De même que dans les roches phosphatées de la région de M'Pando, l'origine de la silice, dans laquelle il faut voir un élément essentiel du dépôt, reste indéterminée.

Calcaire à Foraminifères, silicifié, et faiblement phosphaté. — Pour le caractériser sommairement, il suffit de noter qu'il correspond à une réplique des plus fidèles de la roche du gisement de M'Pando, désignée dans les mêmes termes.

PHOSPHATE DE LA POINTE SAINTE-CATHERINE.

L'unique échantillon de la collection R. Furon que j'ai étudié est caractérisé par une texture stratifiée, résultant de concentrations de matériaux phosphatés, alternant avec des parties finement feuilletées qui en sont généralement dépourvues.

De taille très variable, et susceptibles de mesurer jusqu'à 2 et 3 millimètres de plus grand diamètre, les éléments sont limités par des contours arrondis ou quelconques, groupés sans nulle ordonnance, et non toujours à plat. Ce sont des grains de teinte marron de plusieurs nuances, et, sauf de très rares exceptions, privés d'inclusions organiques et de grains de quartz. Aux exceptions correspondent des éléments renfermant, soit un Foraminifère, soit de multiples sections circulaires limitées par des enveloppes d'une extrême finesse, ne trahissant aucune trace de structure. Beaucoup d'entre eux ont enregistré des traces de pression, sous la forme de petites fissures internes, injectées de silice. Que des grains aient été comprimés, la preuve en est fournie par des éléments déformés, non moins que par l'état de conservation des débris de tissu osseux. Sur les bords des parties feuilletées, on constate une tendance très marquée des grains à s'allonger, à s'étirer pour revêtir finalement une forme amygdalaire, dont les extrémités s'effilent en pointes. Ces matériaux passent par tous les intermédiaires à d'étroites lentilles très allongées, toujours situées dans les plans de stratifications. Il existe en outre, et à titre tout à fait exceptionnel, un grand élément, posé à plat, s'étendant sur presque toute la largeur des sections. Dans toutes leurs manières d'être, les grains n'exercent aucune action sur la lumière polarisée.

Les restes de tissu osseux ont pour principaux représentants des bandelettes, plus ou moins étroites et parfois très longues, le plus souvent disloquées, parfois converties en une série de traits brisés, non complètement séparés.

Les parties phosphatées qui viennent d'être analysées renferment des grains de quartz très clairsemés et des traînées siliceuses, cristallines, qu'il est possible de rattacher à des *Foraminifères* silicifiés, déformés, voire étirés à l'extrême.

Dans les zones dont les grains phosphatés sont exclus, en totalité ou peu s'en faut, on reconnaît des organismes monocellulaires de forme sphérique, à test très épais et siliceux, susceptibles d'appartenir aux *Radiolaires*, signalés par R. Furon, ou à des *Orbulines*, ornées de tous petits piquants, et silicifiés. Le choix entre les deux groupes est chose impossible, en l'état de conservation des sections. En l'espèce, il n'existe ni *Globigérines* ni *Cristellaria*. Mais on retrouve avec la même fréquence que dans une partie des matériaux précédemment analysés, des *Foraminifères*, déformés, étirés, le plus souvent au point que leur nature organique ne peut se déduire que des termes de transition ayant gardé des vestiges de loges. Leurs affinités sont exactement celles qui ont été indiquées pour le phosphate silicifié de M'Pando (p. 783). Il est certain que la contribution des Foraminifères à la constitution de ces zones feuilletées a été importante.

Les éléments, dont il vient d'être question, sont plongés dans une gangue d'opale indifférenciée, en compagnie de quelques granules de quartz, de petites inclusions de calcédonite et

d'une foule de minuscules rhomboédres et grains de calcite, dépourvus de toute trace de corrosion. Et de même que pour les spécimens analysés plus haut, l'origine de la silice reste énigmatique.

CONCLUSIONS.

Bien que réduite à l'analyse d'un petit nombre d'échantillons, l'étude des roches phosphatées, recueillies entre Port-Gentil et Nenghé-Sika, mérite de retenir l'attention.

Il s'y attache un grand intérêt du fait qu'elles sont d'âge sénonien, circonstance qui accroît de beaucoup l'aire favorable à la genèse des phosphates, pendant la période caractérisée par le dépôt de la craie. A aucune autre époque, la sédimentation phosphatée n'a revêtu une pareille extension dans l'espace, en même temps qu'un aussi grand développement en latitude.

Le phosphate en question est en majeure partie individualisé en grains, le plus souvent de grande taille, tous différents de ceux des phosphates nord-africains. Son existence dans les loges de *Foraminifères* est d'autant plus à souligner qu'il faut remonter jusqu'à notre étude des phosphates de Boghari (II, p. 572) et surtout de la craie du Bassin de Paris, pour observer une pareille manière d'être. Cette matière figure encore dans les dépôts étudiés, sous forme de fragments de tissu osseux, susceptibles d'acquérir une certaine fréquence; et, par exception, en tant que débris de carapace de *Crustacé*. Son absence dans la gangue est de règle.

La diffusion des coquilles de *Foraminifères* dans trois échantillons est un autre trait digne d'être mentionné.

Les uns et les autres ont en commun l'existence d'un ciment, en totalité ou en partie siliceux, et dans le premier cas, tantôt exclusivement calcédonieux, tantôt composé de calcédonite et d'opale indifférenciée ou globulaire.

Notons, enfin, le grand développement des phénomènes de silicification, observés dans tous les échantillons, en l'absence presque complète d'organismes siliceux, susceptibles de fournir la silice nécessaire.

B. PHOSPHATES DU MOYEN-CONGO.

PHOSPHATES PRÉLEVÉS ENTRE KOLA ET POUMBOU, AU NORD DE KAYES.

M. Jean Vinçotte, Directeur du Service des Mines de l'Afrique équatoriale française, m'a fait parvenir, en 1936, par l'intermédiaire de M. Haas, chef d'une mission pétrolifère, au Nord de Pointe-Noire, une importante série de matériaux prélevés au Nord de Kayes, dans la région côtière du Moyen-Congo, entre Kola et Poubou. Recueillis par M. Haas, ces échantillons proviennent d'affleurements découverts dans les rivières N'Dongo, Celo et Bondo, et surtout dans les deux premières⁽¹⁾.

Du bref compte rendu de mission qui m'a été communiqué par le Service des Mines sur les phosphates de cette région, il résulte qu'un affleurement situé sur la rivière N'Dongo, contient

⁽¹⁾ Dans toute la bande littorale sédimentaire, les affleurements ne sont visibles que dans les cours d'eau.

une couche phosphatée, à peu près horizontale, puissante de 2 m. 40, et de teneur moyenne de 53 p. 100 de phosphate de chaux tricalcique. De la coupe qui a été levée du gisement, il résulte que la proportion de phosphate de chaux augmente avec la hauteur. De 40,2 p. 100 qu'elle est à la base, elle atteint 64,1 p. 100 au sommet. L'horizon minéralisé, qui se décompose en zones de couleur alternativement blanche et ocre, est compris entre des grès calcaires, au mur, et des marnes vertes avec «sable ocre», au toit. D'une pareille association, on est fondé à conclure que la formation phosphatée a été engendrée en milieu terrigène, et, partant, qu'elle est de nature grossière.

Cette formation occupe le sommet d'une série essentiellement gréseuse, renfermant des horizons fossilifères attribués au Santonien. Elle se présente avec le faciès d'une roche assez friable, concentrée en lits ou lentilles (nodules) de phosphate à peu près pur, associés à des passées lenticulaires ou continues de grès. En plus de la couche phosphatée principale, des lits à nodules de quelques centimètres d'épaisseur ont été repérés en plusieurs endroits, dans les grès du mur, et, en un point, dans les marnes supérieures. A cet ensemble, s'ajoute un horizon de «calcaire dolomitique gréseux», épais de 20-30 centimètres, contenant des lentilles de phosphate, identifiées dans les grès de la couche principale.

De l'analyse succincte de mes matériaux, j'espère tirer quelque lumière sur le milieu qui a donné naissance aux phosphates de cette région.

a. PHOSPHATES DE LA RIVIÈRE N'DONGO.

Grès phosphaté silicifié⁽¹⁾ (piquet 6). Roche grise, un peu cariée, à la façon de la meulière du Bassin de Paris, et renfermant des noyaux quartzeux.

Le fond de l'échantillon est constitué par un silex typique, cryptocristallin, emprisonnant des grains de quartz et des matériaux phosphatés qui viennent de beaucoup en première ligne. Ceux-ci consistent en quelques dizaines d'éléments indifférenciés, pour la plupart de forme générale globuleuse, par exception très allongés, à contours quelconques, et tous isotropes. L'un d'eux est double. Les premiers mesurent en moyenne 0 millim. 5 et les seconds jusqu'à 2 millimètres et davantage. Nombreuses, fines et indéterminées, les inclusions ne sont jamais de nature organique certaine. Les plus répandues, examinées avec de forts grossissements, ne manquent pas d'affinités morphologiques avec les Bactéries. De rares éléments renferment du quartz, ou de nombreux cristaux et grains de calcite, soit silicifiés, soit minéralisés par de l'oxyde de fer. Deux sections transversales de spicules d'*Eponges* ont été observées dans un seul grain. Il existe, en outre, divers débris organiques, en partie phosphatisés et silicifiés. Plusieurs d'entre eux relèvent des *Bryozoaires*, deux autres sont d'anciens *Foraminifères* mal conservés. L'un d'eux représente une section transversale de piquant d'*Oursin*, dont le squelette, très bien conservé, est phosphatisé. D'autres restes organiques indéchiffrables et silicifiés, à structure fibreuse⁽²⁾, ont leurs contours soulignés par un encroûtement de phosphate de chaux.

Moins nombreux que les matériaux phosphatés, les grains de quartz révèlent des formes remarquablement arrondies.

⁽¹⁾ Les désignations entre guillemets reproduisent le libellé des étiquettes accompagnent les échantillons.

⁽²⁾ Ce sont peut-être des débris de carapaces de *Crustacés*.

Très prépondérante, la gangue est composée de calcédonite cryptocristalline, le plus souvent accompagnée de sphérolithes incomplets ou bien développés, parfois groupés en des plages très étendues. Des noyaux à structure de quartzite, engendrés sur place, sont dissimulés en très petit nombre dans le fond de calcédonite cryptocristalline.

La roche procède d'un calcaire phosphaté, quartzeux, renfermant des restes organiques grossiers, dont le carbonate de chaux a été silicifié.

Phosphate en petites plaquettes (piquet 12). — Roche gris blanc se débitant en tout petits fragments et plaquettes très minces, montrant dans l'épaisseur des débris des concentrations souvent stratifiées de grains de quartz. A la loupe, pas un seul élément phosphaté n'est discernable.

La roche est extrêmement pauvre en phosphate, silicifiée à fond et riche en *Foraminifères*.

Limités à quelques individus par préparation, les éléments phosphatés sont représentés par des grains simples, de forme générale arrondie, privés de toute espèce d'inclusions, ou renfermant un ou deux éléments de quartz. La seule différenciation observée, et encore n'existe-t-elle pas toujours, consiste en une fine couronne hyaline, continue ou non.

Le groupe organique est largement représenté par des *Foraminifères* de types très variés réunissant de tout petits individus et de grandes formes à test très épais, les uns et les autres d'excellente conservation, bien que silicifiés. On y trouve, en outre, quelques représentants de spicules d'*Eponges*, réduits à de courts fragments cylindriques, avec trace du canal, et des matériaux de forme allongée, sans structure conservée, lesquels évoquent l'idée de restes de *Mollusques* ou de débris de *Crustacés*, sans qu'il soit possible de se prononcer. Nous apprendrons bientôt qu'une contribution organique de même nature se réclame des *Crustacés*.

Le quartz en grains, d'autant plus irréguliers qu'ils sont plus petits, et de taille sujette à de grandes variations dans une plage donnée (0 millim. 01-1 millim.), vient en première ligne après les *Foraminifères*, mais sans en revêtir la fréquence. Un contraste extrêmement prononcé existe entre les granules en forme d'éclats, constituant une véritable poussière, parfois très développée, et les volumineux grains, bien moins répandus, tendant vers une forme sphérique.

A l'origine, le dépôt devait être un calcaire à *Foraminifères*, quartzeux et très faiblement phosphaté. Du carbonate de chaux, il ne reste pas le moindre vestige, exception faite pour plusieurs grains rhomboédriques convertis en silice. Abstraction faite du quartz, cette dernière substance, qui domine de beaucoup dans l'ensemble de la roche, est d'origine non définie, sauf à dire que la présence de quelques tronçons de spicules légitime la supposition que les Spongiaires ont pour le moins contribué à son élaboration. Elle a pris la place d'organismes calcaires et de la gangue originelle, en respectant sans doute un certain nombre de témoins dont la place est aujourd'hui marquée par des vides. Entre les nicols croisés, tout le fond, très prépondérant, constitué par de la silice secondaire, se résoud en une association de calcédonite et d'opale, engendrant tout au plus des tons ardoisés, comme teinte de polarisation. Une bonne lumière est nécessaire pour la discerner.

Aucune trace de phosphatisation n'est visible dans la gangue.

La silicification à grande échelle et, sans doute, la décalcification qui l'a suivie, sont les principaux épisodes de leur histoire, postérieurement à la sédimentation.

Phosphate presque pur (piquet 13). — Roche gris blanc, un peu grumeleuse, creusée de petits vides paraissant résulter de la dissolution de débris de coquilles.

Le microscope y fait ressortir l'existence de grains de phosphate, de nombreux restes organiques, du quartz parfois abondant et même prépondérant, et d'une gangue phosphatée.

Le phosphate en grains est pur, ou souillé d'impuretés susceptibles de le masquer. Exception faite pour un nombre infime d'éléments, doués d'une structure concentrique à la périphérie, sans agir pour cela sur la lumière polarisée, il est indifférencié dans toute son épaisseur. Les grains les plus répandus mesurent environ 0 millim. 3 de plus grand diamètre. Les plus volumineux peuvent emprisonner un ou deux quartz, et rarement des débris organiques, d'affinités d'ailleurs indéterminées. Des complexes remaniés s'observent dans toutes les coupes. Les uns sont pauvres en inclusions, constituées par des grains phosphatés, des granules de quartz, auxquels s'ajoutent ou non de tout petits *Foraminifères*. Les autres, figurant parmi les plus volumineux, associent généralement une foule de petits grains de quartz, susceptibles de l'emporter, en réservant ou non une très faible place à des éléments phosphatés et à des débris organiques. Les plus gros de ces complexes atteignent 2 millimètres. Grains simples et complexes paraissent constitués par du phosphate isotrope.

En ce qui concerne les organismes libres, il faut signaler l'existence de nombreux *Foraminifères*, susceptibles de l'emporter dans certaines plages, avec les genres *Discorbis* aff. *globularis* d'Orb., très répandu, *Bolivina* sp., *Bulimina* sp., déterminés par Pierre Marie. Le test en paraît toujours calcédonieux. Aux *Spongiaires* se rapportent un volumineux morceau de *Lithistidae* dont les spicules sont dissous, et, peut-être, des spicules globuleux, formant une traînée dans une des préparations analysées. Plusieurs débris ont une microstructure, qui est celle des carapaces de *Crustacés* vivants du groupe des Décapodes. Quelques éléments longs et de forme courbe ou rectiligne, pareils à ceux que j'ai déjà signalés, et que nous allons retrouver avec fréquence dans d'autres spécimens, relèvent très probablement du même groupe. Au total, la contribution organique comporte de grandes variations numériques, suivant les coupes observées. Seul, le groupe des *Foraminifères* est affecté par ces variations dans la dispersion de ses représentants.

Des grains de quartz, petits et gros, figurent en abondance dans certaines plages, où ils arrivent à se toucher, alors qu'ils manquent ailleurs. Les plus volumineux atteignent et dépassent parfois un demi-millimètre. La fréquence des individus à faciès de boules s'est beaucoup accentuée dans ce phosphate, comparé aux précédents. Elle est telle, et la forme globuleuse si bien réalisée, que la question de leur origine éolienne se pose pour ainsi dire d'elle-même.

La gangue phosphatée se différencie ou non en couronnes autour du quartz et des débris organiques, et engendre, à elle seule, des plages d'étendue restreinte. Elle est isotrope ou douée d'une très faible action sur la lumière polarisée.

Une des caractéristiques de la roche est fournie par les vides qui la criblent. Nombre d'entre eux marquent la place d'organismes dissous, ce qui prouve leur morphologie.

L'histoire du dépôt comporte, entre autres épisodes, des phénomènes de silicification, ainsi qu'en témoignent les *Foraminifères*, des phénomènes de dissolution d'organismes siliceux, et une phosphatisation de la gangue. Tout le carbonate de chaux du milieu originel a disparu sans laisser le moindre témoin, bien que, selon toutes probabilités, il fût très répandu dans le dépôt,

avant les transformations qui ont laissé une profonde empreinte, et sur sa composition, et sur sa physionomie.

Enfin, l'hypothèse de l'intervention d'actions éoliennes doit compléter ce tableau.

Phosphate en plaquettes (piquet 14). — Roche se débitant ou non en plaquettes, de couleur gris blanc et de constitution très variée.

Elle consiste en très nombreux grains de phosphate, accompagnés de complexes remaniés, de restes organiques phosphatisés et d'une série d'éléments de quartz, le tout répondant à une teneur élevée en phosphate de chaux.

De volume très variable (0 millim. 2-2 millim.), les grains de phosphate se résolvent généralement en phosphate grisâtre, d'aspect souillé ou non, sans trace d'inclusions organiques. Beaucoup d'individus se chargent d'un pigment noirâtre, susceptible de masquer complètement le fond phosphaté. A de très rares exceptions près, toute trace de structure superficielle fait défaut, et, lorsqu'elle se développe, le produit n'en reste pas moins amorphe. Plusieurs grains doubles ont été observés.

De taille non moins sujette à de grandes différences, les complexes phosphatés ne sont pas toujours franchement individualisés. Ils emprisonnent ou non quelques grains de phosphate, de loin en loin un tout petit *Foraminifère*, des fragments de coquilles non identifiées, du quartz, par exception susceptible de l'emporter, etc.

Indépendamment de ces complexes observés à l'état libre dans la gangue, il existe des fragments d'organismes phosphatisés, dont la structure oblitérée permet rarement une détermination. Certains débris allongés, ornés de traits longitudinaux, font songer à des sections de Bryozoaires, mais il est non moins logique de les rapporter à des débris de *Crustacés*, fossilisés comme nous le verrons plus loin. Il existe d'ailleurs dans le même milieu des fragments qui ont gardé des traces de la microstructure, caractéristique des carapaces de ces organismes. Les *Foraminifères* sont réduits à quelques individus de dimensions exiguës, et à une section très incomplète de forme elliptique, mesurant au moins un demi-centimètre de long.

Le quartz est visible un peu partout dans la gangue, à l'état de grains non calibrés, les uns, anguleux, et, les autres, remarquablement arrondis. Plusieurs d'entre eux, servant de noyaux à des éléments phosphatés, passent par tous les intermédiaires à des grains de quartz, simplement revêtus d'une fine gaine de phosphate de chaux. De rares cristaux de feldspath microcline d'une grande fraîcheur sont transformés en grains subsphériques.

La gangue est en partie composée de phosphate amorphe, indifférencié, développé en plages plus ou moins étendues, et souvent en étroite association avec une matière phylliteuse incolore, représentant une fraction de la roche, qui est loin d'être négligeable. Beaucoup moins réfringente que le phosphate et incolore, cette matière polarise dans des tons atteignant tout au plus le jaune pêche ou orange du premier ordre. Son existence imprime une physionomie très particulière aux coupes examinées entre les nicols croisés. Très souvent, le phosphate se différencie autour des matériaux qu'il agglutine en une mince couronne plus ou moins hyaline, et il arrive qu'il affecte une structure zonaire à la surface d'un complexe remanié.

L'absence de tout vestige de carbonate de chaux est de règle dans les préparations examinées.

Ce type de phosphate n'a pas été observé jusqu'à présent dans la série sédimentaire.

Calcaire dolomitique phosphaté fossilifère (piquet 16). — Roche grise, finement cristallisée, riche en menus débris fossilifères se détachant en blanc. Aucun élément ne se laisse identifier au phosphate de chaux à l'œil nu et à la loupe.

Au microscope, la roche revêt les caractères d'un calcaire dolomitique plus ou moins quartzeux, pauvre en éléments phosphatés, et renfermant des fragments de test convertis en calcite largement cristallisée.

Le carbonate de chaux en constitue le fond. Au sein de plages formées par ce minéral, cristallisé en petits grains irréguliers subrhomboédriques, et parfois représenté par des cristaux parfaits, on peut observer des éléments isolés, ou des flôts de dolomite ou cristaux. Quoique les deux carbonates soient de même teinte et de même taille, on les sépare sans difficulté, grâce à une légère différence de réfringence.

Au quartz se rapportent des grains anguleux, subarrondis et parfois très globuleux, de taille très variable, dont les plus gros atteignent et dépassent à peine 1/2 millimètre. Irrégulièrement distribués, ils se comptent par dizaines dans chaque coupe. Un seul fragment de feldspath triclinique a été observé.

Aussi clairsemé que le quartz, le phosphate de chaux se présente sous la double forme de grains simples très prépondérants et de complexes. Les plus répandus des grains mesurent environ 1/4 de millimètre et les plus gros atteignent 0 mm. 7. La plupart fournissent des sections circulaires ou elliptiques. Tous les intermédiaires existent entre l'élément incolore, limpide, et le grain tellement bourré d'individus qu'il en devient opaque. Du point de vue théorique, le phosphate de chaux de cet horizon leur est redevable de tout son intérêt. On y trouve :

Des granulations gris clair, gris foncé, susceptibles d'abonder, ne fut-ce qu'en marge des grains, et rappelant tout à fait celles des phosphates nord-africains, rapportées à un résidu de matière organique;

Des granules de quartz, absents dans la majorité des matériaux;

Des témoins de calcite, rongés le plus souvent, ou recristallisés, et figurant dans la majorité des grains;

Et dans la plupart des éléments une infinité de corpuscules en forme de bâtonnets et surtout de globules. Les premiers sont rectilignes ou légèrement flexueux, d'épaisseur égale ou variable dans un élément donné. Le plus grand de ceux que j'ai observés mesure 0 mm. 015 de longueur et 0 mm. 0058 de diamètre. Presque tous sont arrondis aux extrémités. Les plus gros des globules atteignent 0 mm. 006 de diamètre. On les observe isolés en majorité, mais ils existent également groupés, accolés n'importe comment, ou tendant à s'ordonner en files. Bâtonnets et globules ont leurs contours fortement ombrés, à la façon des bulles d'air, ou se détachent avec une teinte foncée noirâtre comme s'ils étaient pleins. Des corpuscules irréguliers les accompagnent parfois en très grand nombre. En faisant varier la mise au point de chaque grain, on constate qu'il en est pétri dans toute son épaisseur. Examinées en très bonne lumière naturelle, ces inclusions évoquent immédiatement l'idée de *Bactéries* variées, de taille beaucoup moins exiguë que celle des bactéries des phosphates précédemment étudiés. Ce qu'elles sont réellement, il est de toute impossibilité de le dire.

A la vérité, leurs dimensions et leur morphologie, très variées dans un seul et unique élément, ne sont guère favorables au diagnostic bactérien.

En l'espèce, nulle trace de Foraminifères, de Diatomées et de Radiolaires dans les grains.

Les rares complexes phosphatés remaniés sont ou très anguleux ou parfaitement arrondis. Au premier type se rapportent des éléments mesurant au moins 1 millimètre du plus grand axe; plus petits, les autres ne dépassent guère 0 mm. 5. Les grains de quartz y figurent en proportions très variable, et il arrive qu'ils l'emportent. Des paillettes de phyllite peuvent les accompagner.

En général, le phosphate observé est isotrope. A cette règle font exception quelques grains, réalisant l'unité d'orientation optique en réagissant très faiblement sur la lumière polarisée, et surtout les complexes remaniés dont la gangue est franchement cryptocristalline.

Quelques matériaux libres dans le ciment témoignent d'une structure très finement fibreuse ou spongieuse, telle que je l'ai observée dans des restes de *Crustacés*, les deux manières d'être correspondant à des sections verticales et tangentielles de carapaces. Ce sont les seuls débris organiques sur lesquels il est possible de mettre une étiquette.

La roche doit être classée sous le nom de *Calcaire dolomitique phosphaté quartzeux à débris de Crustacés*.

« *Phosphate à imprégnation noire* » (piquet. 16). Ce phosphate, fourni par la même recherche que le précédent, est teinté en gris jaunâtre. Le fond s'en détache en gris blanc, tantôt avec un aspect mat, porcelainé, un peu concrétionné, tantôt avec une texture très concrétionnée et poreuse. Une matière noire, de nature probablement organique, y est incluse.

Les préparations, faites en dehors des concentrations de l'« imprégnation noire », font apparaître un phosphate à base de gangue, renfermant en moyenne une faible proportion de grains phosphatés proprement dits, quelques complexes remaniés, de très rares débris organiques, et, comme toujours, des grains de quartz en proportions variables.

Les grains phosphatés manquent sur de grands espaces et sont concentrés en d'autres. Ce sont des grains simples, réalisant tous les stades entre les individus presque incolores, très limpides, et les éléments entièrement opaques, les uns et les autres indifférenciés et privés d'inclusions, tant minérales qu'organiques. L'inaction sur la lumière polarisée est la règle.

Les complexes phosphatés remaniés sont peu répandus, petits en général, et minéralisés uniquement par leur ciment. Tous sont plus ou moins quartzeux.

Aux débris organiques, je ne puis rapporter en toute certitude qu'un *Foraminifère* appartenant au groupe des *Miliolites* et un fragment de conservation défectueuse que ses affinités morphologiques rapprochent des *Nummulites* ou d'un type voisin. Plusieurs vides, de forme arquée, marquent probablement la place de fragments de carapaces de *Crustacés*, c'est du moins ce que la constitution de phosphates qui vont être analysés fait supposer.

Plus fréquents que les éléments phosphatés, les grains de quartz comportent une faible proportion d'éléments parfaitement arrondis, par rapport aux matériaux anguleux. Plusieurs feldspaths tricliniques les accompagnent.

L'élément essentiel du dépôt est représenté par une gangue phosphatée, tantôt à peine teintée, tantôt jaunâtre de plusieurs nuances, et tantôt brunie ou souillée par des impuretés qui la rendent absolument opaque. En de multiples points des sections, et non partout, elle se différencie autour des grains de phosphate et de quartz en une couronne à structure finement concentrique, n'exerçant aucune action sur la lumière polarisée. Ailleurs, la même différenciation se produit,

en pleine gangue, pour engendrer une structure concrétionnée très apparente, sous la forme de traits fins, parallèles, ondulés, bien individualisés, susceptibles de se développer sur de grandes plages.

Tout le fond de la roche, les grains de quartz exclus, et les parties concrétionnées comprises, n'exerce pas la moindre action sur la lumière polarisée, sauf en quelques points, où la présence d'un peu de calcédonite, en petits éléments, est perceptible,

Les vides sont fréquents, sans qu'on puisse les attribuer à la disparition de tel élément plutôt que de tel autre. Les très rares exceptions, signalées plus haut, mettent en cause l'existence possible de Crustacés.

Il est de règle que le carbonate de chaux soit exclu du dépôt. Les nombreux vides mentionnés en font supposer l'existence à l'origine du dépôt.

Phosphate presque pur, fossilifère (piquet 17). — Roche gris blanc, d'aspect crayeux. à texture un peu grossière. Composée d'éléments phosphatés de taille et de constitution sujettes à grandes variations, accompagnés de très rares fossiles, elle est riche en quartz et pourvue d'une gangue entièrement phosphatée.

Du grain de phosphate pur, de taille variable (0 mm. 2, 0 mm. 8), on passe par toutes les transitions à de volumineux éléments assimilables à de petits nodules (3 mm.), ces variations pouvant être observées dans l'étendue restreinte d'une même préparation. Et de même, il existe les passages les plus ménagés entre des matériaux de toutes dimensions, exclusivement phosphatés, et des éléments pétris de grains de quartz, réalisant le caractère de grès à ciment phosphaté. Des représentants de ceux-ci contiennent jusqu'à des centaines d'éléments de quartz dans l'épaisseur des plaques.

Le grain banal est composé de phosphate exempt d'inclusions et de différenciation, ou renferme des impuretés indéchiffrables. Quelques-uns contiennent un ou plusieurs quartz. Les matériaux plus volumineux affectent des formes globuleuses ou anguleuses, et il en est de fort irrégulières. Rien dans leurs caractères ne permet de les assimiler à des concrétions proprement dites. Ils varient beaucoup dans leur physionomie, uniquement par leurs inclusions quartzieuses, lesquelles manifestent de grandes irrégularités dans leur distribution. Complètement exclues de volumineux éléments, elles sont très irrégulièrement distribuées en d'autres, voire concentrées et presque contiguës par places, ou absentes sur de grands espaces. Quelques-uns des matériaux à faciès de petits nodules renferment un ou plusieurs grains de type ordinaire, et parfois un morceau de grès phosphaté de forme arrondie ou anguleuse.

Toutes les inclusions organiques, rares en moyenne, se rapportent à de très petits *Foraminifères*, et par exception à de grands individus, rappelant les *Nummulites*. Malheureusement, leur état de conservation ne permet pas de les tenir pour telles avec certitude, bien que les exemplaires observés soient phosphatisés. De loin en loin, on rencontre des débris arqués qu'on peut rapporter sans hésitation à des restes organiques.

La gangue, qui est invariablement phosphatée, l'emporte en de certaines plages. De caractère très uniforme et toujours amorphe, elle ne manifeste jamais la plus petite tendance à se différencier. Outre les matériaux phosphatés passés en revue, elle englobe des grains de quartz de volume très variable (maximum 0 millim. 5) dont les plus gros sont globuleux, concentrés par endroits ou absents en d'autres.

La place qu'elle réserve aux organismes est quasi négligeable. On y peut reconnaître plusieurs *Foraminifères*, identiques à ceux des grains qui rappellent les *Nummulites* et des débris, dont l'absence de structure conservée et la morphologie ne permettent pas de fixer les affinités. La question de leur attribution à des restes de Crustacés se pose, comme pour ceux dont il a été question plus haut.

L'absence de tout témoin de carbonate de chaux est la règle, aussi bien dans les matériaux phosphatés de toute taille que dans le ciment.

Quelles que soient ses manières d'être, le phosphate de chaux est privé de la plus petite action sur la lumière polarisée.

La roche n'est pas autre chose qu'un *gravier à ciment de phosphate* élaboré aux dépens d'un sédiment de composition très variable, en des points très rapprochés, ou dans son épaisseur. Aussi en est-il résulté des éléments très riches, et d'autres, très pauvres, en même temps que des grains de caractère mixte. Leur mise en parallèle avec la gangue engendrée sur place met en évidence quantité de grains identiques d'aspect et de composition. Il en résulte, sans doute possible, que la formation phosphatée en cours de dépôt a été démantelée quelque part, sous la mer, pour engendrer la roche qui vient d'être analysée. Il y a là un témoignage de plus à invoquer en faveur des phénomènes de remaniement sous-marins. Et ce n'est pas le seul qu'on puisse demander aux gisements de l'Afrique Équatoriale française.

Phosphate presque pur, fossilifère (piquet 17). — De même provenance que l'échantillon précédent, le produit se montre consistant, d'une couleur gris blanchâtre, avec un aspect crayeux. La loupe y discerne des vides et quelques grains de quartz.

En dépit des apparences, la roche accuse sous le microscope une grande hétérogénéité. On y observe un fond de phosphate amorphe, prépondérant, indifférencié en de grandes plages, ailleurs d'aspect concrétionné, compact, et, par endroits, criblé de vides, ou caractérisé par une structure bréchoïde. Sur de grands espaces, on ne discerne aucune trace de grains, alors qu'en plusieurs points, ils sont fréquents. Ce sont des éléments de forme générale globuleuse, parfois irrégulière, presque toujours indifférenciés, et, par exception, manifestant une tendance nette à se découper en lignes concentriques à la périphérie. Un seul d'entre eux, pourvu d'un noyau bien distinct, s'est formé en deux temps. Aucune inclusion organique n'y est visible. Leurs dimensions s'échelonnent de 0 mm. 09-1 millimètre, quelques volumineux complexes remaniés les accompagnent. Tous sont bourrés de grains de quartz et confinent au grès à ciment phosphaté, quand ils n'en réalisent pas tous les caractères.

La structure de la roche peut être bréchoïde. Des plages sont, en effet, constituées par des morceaux de phosphate très bien individualisés, appartenant, en général, mais pas toujours, au type indifférencié qui constitue le fond de l'échantillon analysé. De forme subarrondie ou subanguleuse, ils sont reliés par une gangue elle-même phosphatée.

Trois éléments, étrangers aux précédents, méritent d'être signalés. L'un est constitué par un volumineux débris, contenant un *Ostracode*, de forme robuste, à test phosphaté, deux fragments de spicules d'*Eponges* cylindriques, accompagnés d'une *Globigérine* à test relativement fin, très bien conservé. L'autre, qui se résout en un morceau de grès à ciment de phosphate amorphe, compte plusieurs *Globigérines* de grande taille. Le troisième élément renferme une série de petites sections circulaires, d'origine certainement organique mais indéchiffrables. Il se peut que ces

cavités représentent des sections transversales de canaux, comme il s'en trouve dans les carapaces de Crustacés décapodes.

Des *Ostracodes*, identiques à celui qui est inclu dans le débris remanié signalé plus haut, sont disséminés dans les plages bréchoïdes.

Absent sur de grandes étendues, le quartz est représenté par des grains de taille extrêmement variable en des points très rapprochés (0 mm. 02-1 mm.) et parfois rassemblés en grand nombre.

Les plages bréchoïdes ont une gangue phosphatée cryptocristalline. Des matériaux remaniés polarisent faiblement en se parant d'une teinte ardoisée, seulement perceptible en très bonne lumière. Tout le reste du phosphate est amorphe.

Par tous ses caractères, cette roche diffère de la totalité des phosphates analysés jusqu'à présent. Il y faut voir, croyons-nous, le produit d'un double phénomène : *concentration par remise en solution d'un phosphate de chaux et concentration par voie mécanique.*

En d'autres termes, nous serions là en présence d'un phosphate d'origine marine, profondément transformé au cours d'une période continentale. Il est à noter que les morceaux remaniés de la partie bréchoïde procèdent d'un phosphate très riche, exempt de toute espèce de débris empruntés à la terre ferme, et que les fragments de grès phosphatés, incomparablement moins répandus, dérivent d'une formation très riche en matériaux clastiques. Cette opposition de caractères doit être interprétée en faveur, soit d'une grande extension de la roche-mère, de nature très variée dans l'espace, soit d'un remaniement en profondeur d'une couche de phosphate sujette à de grands changements de compositions dans le temps.

b. PHOSPHATES DE LA RIVIÈRE CÉLO.

(Pl. L, fig. 159 et 160; Pl. LI, fig. 161).

« *Dolomie brun clair, gréseuse, avec veines minéralisées de calamine vert clair* » (piquet 27). Les préparations ont été prélevées dans une partie gréseuse, bien caractérisée comme *grès à ciment phosphaté*. Le quartz abonde en grains anguleux, accompagnés de quelques lamelles très minces de mica, le tout plongé dans un ciment de phosphate amorphe, représentant un pourcentage inférieur à celui du quartz. La notion s'impose d'un ciment primitif agglutinant les grains de quartz, jamais contigus. Le dépôt nous laisse ignorant sur la nature de cette gangue originelle, mais ce que nous savons de l'histoire des ciments phosphatés, en général, nous autorise à supposer qu'elle était calcaire, opinion qui n'est corroborée par aucune trace de carbonate de chaux.

« *Grès très phosphaté, à minces stries minéralisées* » (piquet 29). La constitution de cette roche est calquée sur celle de la précédente, sous la réserve que les grains de quartz sont souvent plus espacés, que des grains de feldspath et de silex s'ajoutent en petit nombre au quartz et que la gangue phosphatée paraît réagir très faiblement entre les nicols croisés, en se parant d'une suite ardoisée. L'étiquette attachée à l'échantillon fait supposer que l'horizon n'est pas de constitution homogène, particularité qui ressortirait sans doute de la multiplication des coupes.

« *Phosphate grumeleux* » (piquet 31, fig. 159 et 160). L'échantillon étudié se résout en un phosphate grenu, gris blanc, de faible consistance. Au microscope, la roche contraste avec la totalité des précédentes par la nature, l'abondance et l'état de conservation des restes organiques, qui ne sont pas tous susceptibles d'un diagnostic ferme.

Les matériaux phosphatés, réunis en grand nombre dans chaque coupe sont extrêmement divers d'aspect et de composition. Ils comprennent à la fois des grains proprement dits et des débris organiques.

A la première catégorie se rattachent :

Des éléments réalisant toutes les tailles intermédiaires entre 0 mm. et 2 mm.;

Des grains globuleux, subanguleux, voire très irréguliers (fig. 159, a);

Des éléments toujours privés d'inclusions organiques, dépourvus de quartz ou renfermant des représentants de ce minéral en proportions des plus variables;

Des grains composés de phosphate limpide, ou très opaque, monochrome, ou groupant dans un même individu, les deux types de phosphate, capricieusement associés.

Quel qu'en soit le faciès, tous ces matériaux n'ont jamais d'action sur la lumière polarisée, et sont indifférenciés à la périphérie.

Un coup d'œil rapide sur les coupes y met en évidence un ou deux débris qu'on peut attribuer aux *Bryozoaires* en toute assurance. Ce sont de grands fragments à mailles polygonales, représentant des sections transversales de *Cyclostoma*, converties en phosphate très pur. L'existence de coupes longitudinales reste incertaine.

Au groupe organique il faut rapporter dans chaque préparation plus d'une centaine de débris de forme très allongée, rectiligne ou courbe, en majorité pourvus de traits parallèles à l'allongement (fig. 159 b et fig. 160 a-b). Ces traits, qui évoquent l'idée de lignes d'accroissement, sont, tantôt, inégalement espacés ou équidistants et, tantôt, très rapprochés. Il arrive qu'ils manquent, soit qu'ils n'aient jamais existé soit que la fossilisation les ait détruits (fig. 159 c). En ce cas, on observe quelques cassures transversales ou diversement orientées. De prime abord, on est tenté de rapporter ces matériaux à des débris de tissu osseux privés de structure, et tendant vers les formes prismatiques observées en très grand nombre, principalement dans les phosphates supracrétacés de la Méditerranée Orientale. Une enquête minutieuse fait ressortir, dans une série de ces débris, des traces de divisions transversales de grande finesse. Et de loin en loin, on rencontre un de ces fragments caractérisé par une structure très finement réticulée, qui oriente le diagnostic vers le groupe des *Crustacés* (fig. 159, d et fig. 160, a). Bref, je crois pouvoir conclure à l'existence dans ce phosphate d'une foule de fragments de carapaces de *Crustacés*. Il existe, en outre, mais en nombre limité, des débris irréguliers de forme, de taille moins petite, qui ont conservé ou non des vestiges de microstructure les apparentant aux précédents. Avec une bonne lumière, il est possible de s'assurer que tous les matériaux en question polarisent faiblement dans des tons ardoisés très foncés, en réalisant l'unité d'orientation optique. On peut dire de cette roche qu'elle présente, en beaucoup de points, le caractère d'une *microbrèche de restes de Crustacés*. C'est pour le moment un type absolument unique dans la série des roches phosphatées passées en revue.

Le précédent diagnostic, que je crois pouvoir formuler sous réserve, me paraît justifier l'attribution faite plus haut de débris moins bien conservés à ce même groupe d'organismes. Il est non moins favorable à l'hypothèse que des fragments rectilignes ou arqués, pourvus ou non de traits longitudinaux, réagissant faiblement sur la lumière polarisée, dérivent également de carapaces de Crustacés. Fait digne de remarque, les débris de tissu osseux, complètement exclus de la roche, sont suppléés par des représentants d'un autre groupe fixateur de phosphate de chaux.

Il y a des raisons d'admettre que plusieurs éléments de conservation défectueuse procèdent de *Foraminifères* à test extrêmement robuste, qui sont loin d'être identifiables.

Comme dans tous les phosphates congolais, déjà analysés, la fréquence du quartz reste grande, avec cette différence que ses grains, toujours petits (0 millim. 1-2 millim.) (fig. 159 *e* et fig. 160, *d*) viennent en troisième ligne dans la physionomie de la roche au microscope. Parmi eux, il en est qui ont subi un faible accroissement secondaire, dont le résultat est de denteler leurs contours et de les souder solidement à la gangue.

Celle-ci, toute entière siliceuse, réserve une place variable au quartz microgrenu et à la calcédonite (fig. 159, *f*).

Une fois de plus nous constatons l'exclusion complète du carbonate de chaux, sans pouvoir conclure en toute certitude que son élimination est un caractère acquis, et non originel.

Par les enseignements qui découlent de son étude cet échantillon occupe de beaucoup la première place parmi les phosphates actuellement connus de l'Afrique équatoriale française.

« *Phosphate* » (piquet 32). Roche à structure grossière, chargée d'oxyde de fer, de couleur brunâtre, montrant sur la tranche des éléments de taille variable, irréguliers, anguleux, blanchâtres, à cassure mate, porcelainée. Sous la pression des doigts elles s'effrite un peu.

Bien que très différents d'aspect, au microscope, des phosphates prélevés au piquet 31, les deux groupes sont reliés par d'étroites affinités. On y retrouve les mêmes catégories essentielles de matériaux, mais l'interprétation en serait malaisée au premier examen, si l'analyse n'en était pas éclairée par l'étude des phosphates du type précédent.

Les grains phosphatés d'origine inorganique sont pour la plupart de grande taille (0 millim. 2-3 millim. 3) et de morphologie quelconque. Tous sont indifférenciés, teintés en gris, gris virant au jaune, et jamais cristallins. Les inclusions de quartz y sont fréquentes. Il existe dans chaque coupe quelques éléments globuleux, chargés d'impuretés à des degrés fort divers, et susceptibles d'en être pétris. Aucune trace de débris organiques n'y figure. Le degré de fréquence de ces matériaux est assez grand pour qu'ils se touchent par places.

Un deuxième groupe d'éléments réunit de nombreux fragments de toutes formes, composés de phosphate jaune paille, toujours pur et limpide, dont quelques individus seulement ont conservé une microstructure suffisamment nette pour en trahir l'identité. Cette microstructure est exactement celle des grains finement réticulés, rapportés aux *Crustacés* dans le phosphate du piquet 31. En procédant à un examen prolongé on retrouve assez de vestiges de ladite microstructure, avec passage à des parties qui en sont privées actuellement, pour être fondé à conclure que ce groupe de débris compte de nombreux représentants. En l'espèce, les fragments très longs ornés de traits parallèles fort accentués sont des plus rares, comme le sont également les débris allongés de forme subrectangulaire ou courbe. Quantité d'éléments de forme quelconque, dépourvus de structure

et caractérisés par une teinte jaune paille pure et invariablement exempts d'inclusions de quartz, rentrent, croyons-nous, dans cette catégorie de matériaux. Si la microstructure réticulée manque généralement pour étayer un diagnostic, en revanche on observe dans plusieurs fragments des sections circulaires ou elliptiques de canaux, comme il s'en trouve dans les carapaces de certains *Crustacés* actuels⁽¹⁾. Tous les fragments attribués à ce groupe se différencient des grains de phosphate, non seulement par leur coloration et leur absence d'inclusions de quartz, mais par une action très sensible sur la lumière polarisée, plus apparente que dans le phosphate du piquet 31.

Le ciment est nettement caractérisé comme grés. Très petits, ses grains de quartz sont presque toujours agglutinés par un peu de matière argileuse, et rarement par du phosphate de chaux amorphe.

De même que dans le dernier type étudié, les restes de tissu osseux manquent complètement. En outre, aucun débris ne fait supposer l'existence des Foraminifères. Quant au carbonate de chaux, rien ne démontre qu'il ait pu jouer un rôle quelconque dans l'histoire du dépôt, ce qui n'est pas une raison suffisante pour conclure à son absence sur le fond de la mer génératrice des phosphates analysés.

Roches phosphatées recueillies dans la rivière, à 580 mètres en amont de son intersection avec la route de Kayes-Kola-Poumbou. — D'aspect carié, la roche, teintée en gris blanc nuancé de jaune, rappelle certaines craies consistantes grumeleuses. Des échantillons sont criblés de petits vides, comme il en existe dans certains calcaires lacustres finement vacuolaires.

Le gisement m'a fourni deux types de phosphates, dont l'un est particulièrement intéressant.

1° A la première manière d'être se rapportent deux variétés :

A. L'une d'elles tire sa caractéristique d'une structure bréchoïde, due à la présence dans chaque section de centaines d'éléments, que je crois devoir rapporter à des restes de *Crustacés*. Nombreux sont les débris plus ou moins allongés, de forme grossièrement rectangulaire, accompagnés d'autres incomparablement plus répandus, sans allongement très marqué, tous limpides, dont les mieux conservés sont pourvus d'une foule de traits fins, parallèles. Des fragments, réduits à quelques unités dans chaque préparation, différent des autres par la présence de taches noires, circulaires ou un peu elliptiques, qui paraissent correspondre à des sections transversales de canaux. En l'espèce, l'attribution aux *Crustacés* n'est amplement justifiée que pour une faible proportion d'individus y compris les éléments de transition qui les relient aux matériaux complètement indifférenciés. La parenté morphologique de ces derniers avec les fragments mieux conservés, sans parler de leurs propriétés optiques, ne laisse aucun doute sur l'abondance des restes de *Crustacés*. Tous polarisent en des tons ardoisés très sensibles et s'éteignent d'un seul coup, propriété qui plaide en faveur de leur rattachement aux *Crustacés*.

De taille extrêmement changeante et de forme variable, les éléments phosphatés sont constitués par une matière amorphe et indifférenciée, se détachant en coupe avec une coloration grise, gris foncé, gris noirâtre. Les inclusions organiques font constamment défaut; en revanche, de nombreux grains de quartz figurent dans une minorité de matériaux phosphatés.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Introduction à l'étude pétrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Carte Géol. dét. France*, 1916, Atlas, pl. XLII, fig. 6).

Aux organismes autres que les Crustacés, je ne puis attribuer qu'un fragment de colonie de *Bryzoaire*, représentée par une section longitudinale. Des grains de quartz, indépendants du phosphate, de forme générale anguleuse et de petite taille, accusent une notable fréquence.

La très faible place réservée à la gangue est occupée par une matière argileuse brune, biréfringente dans des tons élevés du premier ordre.

La roche doit être classée comme *phosphate bréchoïde à débris de Crustacés*.

B. Tout différent du précédent, le second type réunit des matériaux phosphatés de forme générale globuleuse, coalescents, ou isolés dans un ciment de phosphate à peine différent de celui des grains. De volumineux éléments, à base de silice cryptocristalline, sont criblés de vides dont une très faible partie marque la place de *Foraminifères*; les autres, d'origine inconnue, affectent des contours irréguliers et anguleux. Les restes de Crustacés sont exclus et les grains de quartz presque absents.

Il y a un tel contraste entre les deux échantillons que les conditions du milieu générateur ont dû changer radicalement au cours de l'élaboration du gisement.

2° Le même gisement a fourni un autre type de phosphate extrêmement différent de tous ceux qui m'ont été envoyés du Moyen-Congo. Les dissemblances portent à la fois sur la composition et sur la constitution du minerai. Trois éléments essentiels en font partie.

A. Le phosphate de chaux est représenté par de nombreux grains de forme sphérique ou ellipsoïdale d'une régularité géométrique, accompagnés d'éléments irréguliers, voire très anguleux. Les uns et les autres sont le plus souvent teintés en jaune paille clair, coloration qui peut être modifiée par des inclusions variées. Celles-ci consistent principalement en granules de quartz anguleux, susceptibles de l'emporter dans certains individus et de manquer dans beaucoup d'autres. Il s'y ajoute accidentellement de petits éléments phosphatés. Une très faible minorité de grains réserve une place importante, voire dominante, à des inclusions de granules de calcite. En outre, tous les matériaux phosphatés, à peu d'exceptions près, renferment une fine poussière de granules calcaires, ressortant entre les nicols croisés comme de minuscules étoiles très brillantes, se détachant d'un fond noir. Aux faibles grossissements on n'y discerne aucune trace organique.

Examinés avec de forts grossissements, tous les grains sont complètement dépourvus d'homogénéité, en ce qu'ils sont pétris d'une infinité de menus débris organiques, presque toujours indéchiffrables. J'y ai reconnu une forme conique très aiguë, allongée, pourvue d'une structure réticulée plutôt lâche, rappelant des formes identifiées à de petits *Radiolaires*, dans les phosphates du Djebel-Onk, par exemple (II, Pl. XXIX, fig. 89), et dans ceux d'Agadour (Maroc) (Pl. XLVI, fig. 46). Il s'y trouve également de loin en loin des sections circulaires, privées de structure, d'origine certainement organique, mais indéterminées. Bref, le microplankton de l'époque a laissé d'innombrables traces dans le dépôt en question. Il est des plus probables qu'en multipliant les sections, on pourrait découvrir des formes identifiables. Jusqu'à plus ample informé, rien ne permet de conclure à l'existence de Diatomées.

B. Les préparations sont riches en éléments calcaires teintés en gris de plusieurs nuances, tous pourvus de contours circulaires ou elliptiques d'une régularité parfaite, et de taille semblable à celle des grains phosphatés. Leur morphologie évoque celle des oolithes calcaires et

ferrugineuses. Ces matériaux sont invariablement constitués par du calcaire cryptocristallin, *identique d'aspect et de constitution à l'un des faciès de la gangue*. Les rares inclusions qu'on y observe sont réduites à des granules de quartz.

C. D'une fréquence relativement grande, les représentants du quartz se font remarquer par les formes les plus globuleuses, observées dans toute la série des dépôts analysés. Il en est qui fournissent des sections rigoureusement circulaires. Leurs dimensions sont du même ordre que celles des grains phosphatés et calcaires.

D. Des éléments, en nombre fort restreint, représentés par des sections allongées ou non, et réagissant faiblement sur la lumière polarisée, se rapportent vraisemblablement aux restes de Crustacés. Pour l'un d'eux, tout au moins, l'attribution n'est pas douteuse, en raison de l'existence d'un fin quadrillage très caractéristique.

Le ciment de cette roche, qui est entièrement calcaire, affecte deux faciès différents : dans l'un de mes échantillons, il se résout uniquement en calcite très largement cristallisée, et dans l'autre il est composé de calcaire cryptocristallin pareil à celui des pseudo-oolithes calcaires. La parenté en question ne résulte pas seulement de l'aspect général du calcaire et de son égale finesse de cristallisation, mais elle est encore attestée par les granules de quartz anguleux et de très petite taille, disséminés de part et d'autre avec le même degré de fréquence.

Par la morphologie de ses trois éléments essentiels en présence, cette roche est vraiment unique. Elle trahit l'intervention d'actions mécaniques intenses, nécessaires pour remanier les éléments phosphatés et calcaires et les façonner à un degré exceptionnel. La communauté de caractères des matériaux calcaires et du ciment cryptocristallin pose une fois de plus le problème des phénomènes de remaniement aux dépens d'un sédiment en voie de formation, et consolidé immédiatement. Quant à la morphologie des grains de quartz, on peut dire qu'elle est particulièrement favorable à l'hypothèse d'une intervention éolienne.

La conclusion formulée plus haut que le milieu générateur a subi d'importants changements au cours du dépôt des phosphates, fournis par une seule et même recherche, se trouve amplement confirmée par les caractères des minerais qui viennent d'être analysés.

c. PHOSPHATES DE LA RIVIÈRE BONDO.

Grès phosphaté silicifié (piquet 10). — Roche grise un peu cariée, à la façon de la meulière du Bassin de Paris, avec noyaux silicifiés de forme irrégulière.

Il s'agit, en réalité, d'un silex, à la fois phosphaté et quartzeux. En fait de matériaux phosphatés, il s'y trouve des grains de type banal, de forme générale arrondie, indifférenciés, isotropes, sans inclusions, et se comptant par dizaines dans chaque coupe. Relativement petits, leurs dimensions s'échelonnent de 0 millim. 22 à 1 millimètre. Avec eux, on rencontre de rares éléments renfermant du quartz, ou de nombreux cristaux et grains de calcite, soit silicifiés, soit minéralisés par de l'oxyde de fer. L'un d'eux montre deux sections transversales de spicules d'*Eponges*.

Il existe en outre, mais à l'état libre dans le ciment, plusieurs *Foraminifères*, à test épais, mal conservés, deux sections de piquants d'*Oursins*, l'une transversale et l'autre longitudinale, dont le squelette, très bien conservé, est phosphatisé. D'autres restes organiques allongés, silicifiés, à

structure fibreuse, avec des contours encroûtés de phosphate de chaux, se rapportent peut-être à des restes de Crustacés.

Moins nombreux que les matériaux phosphatés, les grains de quartz revêtent pour la plupart des formes remarquablement arrondies.

Très prépondérante la gangue est composée de calcédonite, cryptocristalline le plus souvent, accompagnée de sphérolithes incomplets ou bien développés, parfois groupés en des plages très étendues.

La roche procède d'un calcaire phosphaté, quartzeux, renfermant des restes organiques grossiers dont tout le carbonate de chaux a été remplacé par de la silice.

GÉNÉRALITÉS SUR LES PHOSPHATES DU MOYEN CONGO.

Les phosphates du Moyen-Congo, originaires de la région de Kola, diffèrent de la totalité de ceux que j'ai analysés jusqu'à présent, au point qu'ils représentent une entité nouvelle des miex caractérisées. Les différences portent principalement sur les matériaux phosphatés, sur les organismes qui les accompagnent et, partant, sur les conditions réalisées par le milieu générateur. Il en résulte pour eux une physionomie très particulière au microscope.

CONSTITUTION DES PHOSPHATES.

Grains phosphatés et quartz clastique. — En moyenne, ce sont des phosphates grossiers, composés d'éléments de taille fort diverse, groupés sans ordre. De la constitution des matériaux phosphatés, retenons que la forme en est globuleuse, ou quelconque, que, règle presque absolue, les débris organiques en sont exclus, et que le phosphate est, pour ainsi dire, toujours indifférencié.

La contribution organique à la formation des grains observés est réduite à la présence de très rares *Foraminifères*, à l'existence d'un seul *Ostracode*, de plusieurs tronçons de spicules d'*Eponges*, et de quelques fragments attribués à des *Crustacés*. Il y faut peut-être ajouter l'intervention de *Bactéries*, rassemblées en nombre dans des grains d'un phosphate de N'Dongo (p. 791). Les Diatomées, dont on sait le rôle fondamental dans la constitution des grains des phosphates nord-africains et mauritaniens, manquent complètement, ainsi d'ailleurs que les Radiolaires.

Une des caractéristiques desdits grains est de renfermer, ou non, des éléments de quartz en proportions extrêmement variables, avec tous les passages au grès à ciment de phosphate de chaux amorphe. Une même coupe mince peut réunir des représentants de la totalité des variantes observées dans un échantillon. Notons, à ce sujet, qu'un type de grains caractérisé par une morphologie spéciale n'existe jamais à l'état d'inclusions, ce qui tend à démontrer que les grains libres et ceux qui sont emprisonnés dans les éléments phosphatés ont des provenances différentes.

Le quartz fait partie intégrante de tous les ciments. Il y figure souvent en proportions très changeantes en des points rapprochés, et, d'une manière générale, avec des tailles sujettes à de grandes différences. Des variétés sont très quartzieuses. Il serait superflu d'insister davantage sur le rôle joué par ce minéral, si la morphologie d'une partie de ses représentants ne posait pas la question d'une intervention éolienne. Des grains, en grand nombre, parmi les plus volumineux, sont pourvus de formes globuleuses, tellement bien réalisées qu'on est tout naturellement conduit à faire appel à des actions éoliennes pour les façonner. Toute certitude absolue, en la

matière, est malheureusement hors d'atteinte, par suite de l'impossibilité d'examiner les matériaux en cause à l'état libre, pour s'assurer que leur surface est finement écaillée ou non. C'est un fait que cette morphologie particulière n'a été observée jusqu'à présent en milieu phosphaté que dans les gisements du Moyen-Congo.

Ces données s'ajoutent utilement à celles qui ont été réunies par Th. Monod⁽¹⁾ et A. Cailleux⁽²⁾ pour conclure que, *selon toutes probabilités, les plus anciennes manifestations des phénomènes éoliens de l'Afrique équatoriale remontent à une haute antiquité.*

Organismes. — Les phosphates de cette région de Kola empruntent un de leurs traits essentiels aux organismes qu'ils contiennent, indépendamment des grains de phosphate. Les caractères paléontologiques propres au domaine étudié, sont à la fois négatifs et positifs. Aux premiers correspond l'absence absolue de Diatomées et à une exception près, de Radiolaires (p. 799). Les seconds sont relatifs aux matériaux presque toujours indépendants des grains. Leur degré de fréquence varie d'une rareté parfois grande à une diffusion qui les classe au rang d'éléments constituants essentiels. Ce sont des *Foraminifères*, susceptibles d'abonder par exception (piquet 12, p. 788), des piquants d'*Oursins* limités à deux exemplaires (piquet 10, p. 787), quelques *Ostracodes* réservés à l'une des fouilles (piquet 17, p. 794), des restes de *Bryozoaires*, non moins exceptionnels (piquet 6, p. 787), et, au tout premier rang, des débris de *Crustacés*, particulièrement nombreux dans l'une des fouilles (piquet 31, p. 706), et représentés, généralement en faible proportion, dans toute une série d'échantillons. Chose intéressante, *les fragments de carapaces de Crustacés jouent dans ces phosphates le rôle des débris de tissu osseux, dans les phosphates de l'Afrique du Nord et d'autres encore.* La substitution est poussée tellement loin qu'il est impossible d'observer au microscope le plus petit témoin de l'existence de Poissons, de Batraciens ou de Reptiles dans l'ensemble des dépôts analysés. L'état de conservation de ces fragments est très divers. Les morceaux de carapaces, caractérisés par une microstructure qui ne laisse aucun doute sur leur identité, passent à d'autres qui n'en ont gardé que des traces, puis à des débris pourvus de traits longitudinaux correspondant à des lignes d'accroissement, et finalement à des éléments qui rappellent par leur morphologie seule les restes plus ou moins bien conservés. Si le diagnostic fondé sur les caractères morphologiques des éléments est exact, — j'estime qu'il y a toutes chances pour qu'il le soit — la plupart des matériaux analysés contiennent des témoins de l'existence de *Crustacés*, ne fût-ce qu'en nombre infime.

L'intérêt de la question est loin d'être exclusivement paléontologique, attendu que les roches étudiées sont redevables d'une partie de leur teneur en phosphate aux fragments de carapaces de *Crustacés*. Tous les débris que je leur attribue se signalent entre les nicols croisés par une polarisation faible, dans les tons ardoisés très atténués, chacun d'eux réalisant toujours l'unité d'orientation optique.

Ciment. — Il contribue presque autant que les éléments phosphatés, le quartz et les organismes, à assurer aux dépôts étudiés une physionomie aberrante. Très varié dans sa constitution,

⁽¹⁾ Théodore MONOD et André CAILLEUX. — Ancienneté des actions désertiques dans le Sahara occidental (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXV, 1942, p. 362-363).

⁽²⁾ André CAILLEUX. — Importance et signification paléobiologique des déserts cambro-siluriens (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXVI, 1943, p. 895).

il tire sa caractéristique du grand développement de phosphate de chaux, faisant l'office de gangue. Nulle autre formation phosphatée, analysée jusqu'à présent, ne réserve, et à beaucoup près, une place égale à celle qui lui est dévolue dans les phosphates du domaine de Kola.

Dans la majorité des échantillons, la gangue est exclusivement composée de phosphate amorphe. En deux cas seulement, la matière se différencie pour engendrer des couronnes autour d'une partie des grains, ou revêtir un aspect concrétionné à l'intérieur des plages qu'elle constitue. Il arrive que la place réservée au ciment de phosphate amorphe représente une très importante fraction de la roche. Dans deux échantillons, le phosphate s'associe à de la matière argileuse réalisant deux types distincts. Dans un troisième, la gangue est constituée par un grès à ciment phosphaté.

Une autre variété de ciment intervient sous la forme de silice, convertie en calcédonite cryptocristalline, associée ou non, soit à de l'opale plus ou moins globulaire et accessoire, soit à du quartz secondaire.

ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE L'ÉTUDE DES PHOSPHATES DU MOYEN CONGO.

La constitution de ces phosphates appelle maintes remarques dont voici les principales :

1° A une seule exception près tout le carbonate de chaux a disparu des phosphates étudiés, mais la constitution de plusieurs d'entre eux implique l'existence de cette substance à l'origine. Tel est le cas, notamment, pour les dépôts qui renferment des *Foraminifères* phosphatisés ou silicifiés. Quelques autres organismes, eux-mêmes phosphatisés (*Ostracodes*, *Bryozoaires* et débris d'*Oursins*) plaident dans le même sens. Il y a lieu de supposer que des vides, parfois importants, observés dans plusieurs des échantillons, résultent au moins pour partie d'un phénomène de dissolution du carbonate de chaux. En outre, les nombreux témoignages de silicification, signalés chemin faisant, conduisent à penser que tous les phosphates étudiés procèdent de dépôts plus ou moins calcaires primitivement. Enfin, bien que les éléments phosphatés, à l'encontre de ceux des gisements nord-africains, ne renferment presque jamais de témoins calcaires, démontrant qu'ils résultent d'une phosphatisation du carbonate de chaux, il n'en est pas moins logique d'admettre que la substitution du phosphate au carbonate est pour eux, comme pour les autres, un épisode important de leur histoire.

2° Les caractères propres de la faune, associée aux produits phosphatés, contribuent pour beaucoup à accréditer l'opinion que le milieu générateur des phosphates analysés diffère, dans une très large mesure, de celui des phosphates Nord-africains. Pour des raisons qui échappent complètement, ce milieu est inaccessible aux Vertébrés marins et aux Poissons en particulier, mais il est fréquenté par d'innombrables *Crustacés*, jouant, eux aussi, le rôle d'agents fixateurs du phosphate de chaux. L'exemple est pour le moment unique parmi les phosphates des temps secondaires et tertiaires. Les organismes, qui font cortège aux Crustacés, sont eux-mêmes différents de ceux qui accompagnent les restes de Poissons dans les phosphates Nord-africains.

3° D'autre part, les innombrables morceaux de phosphate très quartzeux, les grains de quartz libres, ainsi que leur extrême variation de taille dans une même préparation, le volume des matériaux, et leur absence complète de classement qui paraît, à première vue, incompatible avec l'intervention d'un milieu marin, imposent l'idée d'un dépôt entraîné dans un bassin de pro-

fondeur très réduite, et d'extension trop limitée pour que le classement de ses éléments soit possible.

Ce bassin paraît avoir été soumis à de grands changements, soit dans l'espace à un moment donné, soit dans le temps. Les matériaux d'étude recueillis en série, en chaque point, manquent pour trancher la question avec toute la rigueur désirable. Mais qu'il en fût ainsi, le fait que les échantillons extraits de la même fouille peuvent différer beaucoup et que les complexes, remaniés dans un même échantillon, sont susceptibles d'appartenir à de nombreuses variétés, tend à le démontrer. De ce chef, il existe une différence considérable dans les conditions de genèse des gisements du Nord de l'Afrique et de l'Afrique équatoriale.

4° La morphologie d'un grand nombre de grains de quartz inclus dans les dépôts phosphatés, accentue le caractère très particulier de ce bassin, en ce qu'elle paraît impliquer l'intervention d'apports éoliens. Si cet enseignement est l'expression de la vérité, comme j'incline à le croire, il contribue avec d'autres données, ainsi que je l'ai déjà noté (p. 802), à démontrer que le *régime désertique d'une partie de l'Afrique remonte à une haute antiquité*.

5° L'histoire des phosphates qui viennent d'être analysés fait ressortir l'existence d'un épisode commun à la totalité des types passés en revue. Il s'agit du remaniement des éléments constituant, tous, et sans exception, formés dans un milieu autre que celui qu'ils occupent. En dépit des traits essentiels qui leur appartiennent en propre, les phosphates étudiés se réclament, eux aussi, d'une genèse en deux temps. En l'espèce, le second temps acquiert une importance exceptionnelle.

Des matériaux, en nombre presque négligeable, témoignent d'un épisode de remaniement supplémentaire. Tel est le cas pour de rarissimes grains pourvus de noyaux jouant le rôle de corps étrangers, et de complexes remaniés contenant des grains qui ont été remis en mouvement, avant d'être incorporés aux minerais dont ils ont été extraits.

6° Un de mes échantillons, et un seul, fait supposer qu'une forte proportion de phosphate a été remaniée par des actions continentales. Il y aurait là, amorcé tout au moins en un point, un phénomène calqué sur celui qui a fait subir à des phosphates pauvres, au Sud-Est des États-Unis, une transformation profonde, génératrice de phosphates très riches.

7° Les particularités de constitution des phosphates du Moyen-Congo, qui leur appartiennent en propre, concourent évidemment à les différencier des autres dans leurs caractères physiques. Mais elles sont insuffisantes, à mon sens, pour rendre compte de la physionomie aberrante desdits phosphates. Peut-être sommes-nous là en présence des phosphates prélevés à la surface ou à son voisinage, dans une région où les agents atmosphériques font sentir profondément leur influence sur les dépôts superficiels. Dans cet ordre d'idées, il importe de signaler que les phosphates du Moyen-Congo se singularisent, notamment, par les phénomènes de dissolution dont ils ont été le théâtre, en même temps que par l'absence de résidu calcaire, épargné par la phosphatisation et la silicification. Loin d'être la conséquence de la destruction d'un tel résidu par dissolution, cette absence résulte, ou peut résulter, d'une phosphatisation ou d'une silicification intégrales, qu'il s'agisse des grains, des organismes ou du ciment.

8° Autant il est facile de remonter à la source de la silice qui a engendré les silex et les phénomènes de silicification en Afrique du Nord, autant il est difficile d'assigner une origine à la silice

des phosphates du Moyen-Congo, dont il vient d'être question. Les très rares fragments de spicules conservés, et l'absence complète de spicules dissous ou calcifiés, interdisent, me semble-t-il, de mettre les Spongiaires à contribution. L'absence absolue de Diatomées et à peu de chose près de Radiolaires dans toute la formation phosphatée conduit à la même conclusion en ce qui les concerne.

9° L'extrême variabilité de la constitution des produits signifie évidemment qu'ils ont pris naissance dans un milieu complètement étranger à celui qui a doté l'Afrique du Nord de ses phosphates en grains. Ceux-ci ont été élaborés en milieu pélagique, ce qui explique leur grande extension en même temps que les nombreux caractères qu'ils ont en commun. Ceux-là ont été engendrés en milieu terrigène, aux dépens d'une formation plus ou moins calcaire, comme il s'en trouve dans les dépôts marins placés sous la dépendance de la terre ferme, et dans des conditions variant d'un point à l'autre. Telle est la raison qui me porte à croire que leur développement en surface et en puissance ne saurait se comparer, et tant s'en faut, à celui des phosphates sénoniens et nummulitiques qui ont été longuement analysés.

10° Sous le rapport théorique, la découverte de ce bassin revêt une grande importance, du fait qu'elle nous met en présence d'une entité absolument nouvelle et qu'elle complète utilement les enseignements qui découlent de l'étude des phosphates plus ou moins riches en restes de Vertébrés. A ce sujet, je me borne à noter que l'intervention des *Crustacés*, de même que celle des *Vertébrés* dans les phosphates en grains du Nord de l'Afrique, signifie simplement que *le milieu générateur s'est révélé favorable au développement des organismes fixateurs d'acide phosphorique*. Supposer que la fixation en grand du phosphate de chaux est la conséquence de la présence des *Crustacés* me paraît le contre-pied de la vérité. Le problème soulevé sera examiné à fond en temps utile.

11° D'après le rapport de mission qui m'a été communiqué, la formation phosphatée se développe au sommet d'un complexe que les fossiles ont permis de rapporter au Santonien. L'existence de très rares sections d'aspect fruste, évoquant l'idée de *Nummulites* par leur dessin général est loin de suffire pour infirmer un pareil diagnostic.

Nul doute qu'à défaut d'une documentation paléontologique décisive, on ne serait nullement enclin à rapporter ces phosphates au Sénonien, tant ils diffèrent, comme ceux du Gabon d'ailleurs, des phosphates que nous sommes accoutumés à observer à cette époque. On sait que la raison de cette différence doit être cherchée dans l'intervention de milieux générateurs profondément dissemblables.

Du point de vu pratique, les phosphates de la région de Hala sont loin d'être dénués d'intérêt. Pour peu qu'ils aient une certaine continuité dans l'espace, ce que les recherches paraissent démontrer, l'étendue prospectée doit recéler un tonnage suffisant pour justifier une mise au point de la question.

Tôt ou tard, on leur demandera de subvenir aux besoins de l'agriculture régionale. A coup sûr, il eût mieux valu les découvrir à l'intérieur des terres, où la concurrence des phosphates marocains s'exercerait moins facilement. Dans l'ignorance très grande où nous sommes, il n'est pas interdit d'envisager l'hypothèse de l'existence de plusieurs petits bassins, échelonnés le long des rivages de l'époque, bassins de profondeur extrêmement réduite, et soumis à un régime aberrant, dont, il faut bien le dire, l'image exacte nous échappe.

COUP D'ŒIL SUR LES PHOSPHATES DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE.

Entre les gisements du Gabon et du Moyen-Congo, dont les phosphates me sont connus, je ne sais dans quelle mesure, il y a des traits communs et d'importantes dissemblances.

Tous sont constitués par les phosphates en grains inclus dans une gangue, qui s'oppose généralement à leur dissociation. Et ces grains réalisent un type tout autre que celui des craies phosphatées et des grandes accumulations de l'Afrique du Nord. Ils se font remarquer, au premier abord, par leurs dimensions très variables, non seulement dans un échantillon donné, mais dans une coupe mince, avec prédominance très nette d'individus de grande taille. Le phosphate qui les forme est toujours amorphe et indifférencié, et de surcroît, les inclusions organiques, qui jouent un rôle capital dans les autres phosphates en grains, y sont pour ainsi dire inconnues. Celles que, par exception, on y peut observer, sont d'une toute autre nature. Au risque de me répéter, je rappelle une fois encore, que les Diatomées, et les Foraminifères en sont exclus, et qu'il en va de même, à une exception près tout à fait négligeable pour les Radiolaires.

Il est clair que les deux bassins sont profondément différenciés par les faunes qui participent à la constitution des dépôts phosphatés. Dans celui du Gabon, les *Foraminifères* abondent en compagnie de restes de Vertébrés, alors que dans l'autre des *Crustacés* devaient pulluler par places à certains moments.

Les différences n'empêchent pas les dépôts phosphatés passés en revue de résulter, comme tous les autres, de l'intervention de deux milieux distincts, correspondant respectivement à la genèse et à la concentration des matériaux, et les milieux générateurs d'être favorables au remaniement des phosphates en voie de formation. Un terme de complication, d'ailleurs unique pour l'instant dans le domaine considéré, réserve un rôle important à du phosphate engendré postérieurement à la sédimentation, sous l'influence probable d'agents météoriques.

Les gisements du Moyen-Congo se singularisent entre tous par le développement, la fréquence, voire la prédominance du phosphate, non remanié mais élaboré *in situ*, ce qui porte à deux le nombre de générations de phosphate. Seuls, certains dépôts de l'Afrique Occidentale peuvent rivaliser avec eux, au point de vue du rôle joué par le phosphate secondaire dans la constitution des minerais.

Un autre trait fondamental est fourni par l'ampleur des phénomènes de silicification, localisés dans le ciment, et, par exception, dans les matériaux phosphatés et les *Foraminifères*. Dans tous les cas, rien ne fait pressentir l'origine de la grande masse de silice mise en œuvre. L'hypothèse que des organismes siliceux ont été sacrifiés en grand nombre, sur le fond de la mer, est de celles qu'on peut logiquement envisager.

D'une manière générale, le carbonate de chaux a été complètement éliminé des dépôts considérés, non par dissolution tardive, mais par phosphatisation et silicification. Au fond, l'exception, tirée des roches calcaires plus ou moins phosphatées du Gabon et du Moyen-Congo, ne doit pas être prise en considération, attendu qu'elles sont exclues des minerais proprement dits.

Les deux gisements diffèrent encore par l'existence dans le district de Kola de phosphates riches en matériaux dont la morphologie paraît trahir l'intervention d'actions éoliennes.

Tout bien considéré, on peut dire, en manière de conclusion, que *les phosphates en question font partie d'une seule et même province pétrographique, tout entière située en milieu terrigène, et dédoublée en deux bassins, sous le rapport paléontologique.*

De l'attribution au Sénonien des phosphates de l'Afrique Équatoriale française, il résulte que l'extension des mers à phosphates, à la fin des temps secondaires, a revêtu une ampleur à jamais égalée. Rappelons que cette extension intéresse tout le domaine s'étendant en latitude, entre et y compris l'Angleterre et l'Afrique Équatoriale. Pourquoi l'époque et le domaine en question ont-ils été exceptionnellement favorables à la genèse des phosphates? Pour le moment, la question ne comporte pas de réponse vraiment satisfaisante.

RAPPORTS ET DIFFÉRENCES ENTRE LES PHOSPHATES DE L'AFRIQUE DU NORD ET CEUX DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET ÉQUATORIALE FRANÇAISE.

Si l'on met en parallèle les phosphates de l'Afrique Occidentale et Équatoriale française et ceux du Nord de l'Afrique, on constate que les différences l'emportent sur les analogies :

1° Les uns et les autres sont apparentés par un trait qu'ils ont d'ailleurs en commun avec la totalité des phosphates sédimentaires, à savoir que la formation des gisements implique toujours l'existence de deux milieux distincts, l'un, où les éléments phosphatés s'élaborent et l'autre, où ils s'accumulent.

Une autre analogie est tirée de la présence de matériaux phosphatés, remaniés aux dépens de la formation en voie de dépôt, autrement dit de l'intervention de remaniements sous-marins. Provisoirement, tout au moins, les phosphates du Soudan n'offrent aucun exemple de pareils remaniements.

Enfin, les phénomènes de phosphatisation du carbonate de chaux représentent un épisode de première importance dans la genèse des éléments phosphatés, mais seulement dans les gisements élaborés à proximité de l'Atlantique.

2° Le compte des différences l'emporte et de beaucoup.

Au premier plan, se détache le fait capital que les matériaux phosphatés du domaine nord-africain ont pris naissance en milieu *pélagique*, alors que ceux des gisements de l'Afrique Occidentale et Équatoriale française se réclament des sédiments *terrigenes*, exception faite pour les phosphates à Diatomées de Mauritanie. La plupart des dissemblances signalées chemin faisant en découlent.

A ce compte, il faut encore inscrire le caractère très grossier des dépôts phosphatés, tous différents, à peu d'exceptions près, des phosphates en grains de l'Afrique du Nord, et le très grand développement des gangues phosphatées, résultant d'un second temps de phosphatisation, dont l'équivalent en importance n'a jamais été observé, et à beaucoup près, dans les nombreux dépôts passés en revue en dehors du domaine considéré. De cette phosphatisation supplémentaire, il n'y a aucune trace dans les phosphates du Sahara soudanais. Il faut encore ajouter le rôle, prépondérant ou non, joué par un phosphate secondaire à faciès aberrant, observé dans deux gisements (Gabon et Moyen-Congo), attribué, sans preuves décisives, à des actions météoro-

riques, remaniant et concentrant une partie du phosphate élaboré suivant le processus ordinaire. Notons que ce remaniement est lié géographiquement à des conditions de milieu, seulement réalisées non loin de l'équateur, ce qui est également le cas pour les gisements de la Caroline du Sud et de la Floride, où les phénomènes de remaniement et de concentration ont acquis une ampleur exceptionnelle.

Un dernier trait d'ordre minéralogique est tiré des grains de quartz. Par la raison que les phosphates en question relèvent presque tous des sédiments terrigènes, une place importante leur est réservée, sauf dans les phosphates du Soudan. D'une façon générale, les grains sont beaucoup plus fréquents, souvent volumineux, et toujours dépourvus de préparation mécanique, en quoi ils diffèrent de ceux des phosphates nord-africains. Au surplus, la diffusion des éléments qui paraissent avoir été façonnés par une érosion éolienne est à souligner tout particulièrement.

Le domaine paléontologique fournit, à lui seul, un élément de différenciation de première importance, en ce qu'il nous révèle l'existence d'une faune appartenant en propre aux phosphates de l'Afrique Occidentale et Équatoriale française.

En conclusion, on peut dire que les phosphates des deux vastes régions, mis en parallèle, ont en commun les traits permanents de l'histoire de tous les gisements, quels qu'ils soient, et que, cette réserve faite, ils diffèrent dans leur constitution, au point qu'ils caractérisent deux domaines foncièrement distincts.

Développés à proximité de l'Atlantique, les phosphates qui s'échelonnent de la Mauritanie au Moyen-Congo constituent un groupe extrêmement hétérogène, se reliant, comme nous le savons, à celui des phosphates nord-africains par l'intermédiaire des dépôts à Diatomées de Daoualel. En dépit de cette diversité de caractères, ils réalisent, pour la très grande majorité, une entité qu'il est difficile de concevoir mieux définie.

Sous le rapport économique, je suis fondé d'affirmer que les conditions de milieu, qui ont présidé à la formation des phosphates de l'Afrique Occidentale et Équatoriale française, ne sont favorables, ni à la genèse des phosphates très riches, ni à celle d'un bassin de grande extension. Dans le domaine envisagé, seule l'intervention tardive d'agents météoriques peut élaborer des concentrations de grande valeur aux dépens des dépôts, tels qu'ils ont pris naissance dans la mer. Reste à savoir si cette intervention s'est produite, et, dans l'affirmative, à quelle échelle elle s'est manifestée.

CHAPITRE VI.

PHOSPHATES TERTIAIRES AUTRES QUE LES PHOSPHATES AFRICAINS.

Lorsque j'ai établi le plan et fixé les divisions de mon étude des phosphates de chaux sédimentaires, j'avais l'espoir de pouvoir soumettre à l'analyse, non les phosphates exploités en Caroline du Sud et en Floride, mais leurs roches-mères qui, par elles-mêmes, sont dénuées d'intérêt pratique. Quelle qu'en soit l'importance, les riches gisements de ces deux États, dont la genèse se réclame d'actions chimiques et mécaniques d'origine continentale, ne sauraient trouver place dans une étude, consacrée aux milieux sous-marins générateurs des phosphates sédimentaires proprement dits. Il en résulterait pour mon travail un hors-d'œuvre de nulle utilité pour les enseignements qui en doivent découler.

Quant aux roches-mères, qu'on laisse toujours dans l'ombre au profit des produits de valeur qui en dérivent, il m'a été impossible de m'en procurer le moindre échantillon, et, de surcroît, j'ignore presque tout de leurs caractères lithologiques, ainsi que des particularités, instructives à notre point de vue, que peuvent présenter les successions stratigraphiques des dépôts plus ou moins phosphatés. Tout en exprimant le regret de n'avoir pu combler cette lacune, je suis fort éloigné de croire qu'elle puisse restreindre l'intérêt des nombreux faits d'observation consignés dans ce mémoire.

Les dépôts phosphatés d'âge post-éocènes et d'origine marine, reconnus jusqu'à présent, sont presque toujours redevables de la totalité de leur phosphate de chaux à la présence de dents et d'ossements fossiles. Il suffit d'en signaler l'existence sans commentaires.

Font exception à cette règle les formations-mères des phosphates de la Caroline du Sud et de la Floride.

D'après L. de Launay⁽¹⁾, à qui j'emprunte les quelques données suivantes, les gisements phosphatés de la Caroline du Sud résulteraient d'une concentration superficielle, aux dépens d'un substratum calcaire, faiblement phosphaté, et d'ossements d'âge divers. Au dire de l'auteur, l'élaboration de ces phosphates riches ne serait pas interrompue de nos jours. Le complexe pauvrement phosphaté comprend les calcaires phosphatés de Vicksbourg, d'âge oligocène inférieur, «recouverts en concordance par l'oligocène supérieur et le miocène, contenant eux aussi des bancs phosphatés». Très phosphaté dans sa partie supérieure, par suite d'un enrichissement

⁽¹⁾ L. de LAUNAY. — *Traité de métallogénie. Gîtes minéraux et métallifères*, t. I, 1913, p. 697 et 698.

résultant d'un phénomène de concentration, le calcaire, qui seul nous intéresse en l'espèce, ne titre que 8 ou 10 p. 100 en profondeur. J'ignore sa puissance, ainsi que la manière d'être du phosphate mis à contribution pour engendrer le gisement exploité.

Les phénomènes de concentration et de remaniement qui ont donné naissance aux très riches gisements de Floride mettent à contribution des formations oligocènes et miocènes. Comme point de départ, on retrouve encore les calcaires oligocènes de Vicksbourg « légèrement phosphatés », d'une épaisseur maxima de 150 mètres, surmontés de calcaires miocènes, répartis en minces couches horizontales.

La remise en mouvement de l'acide phosphorique, d'origine première marine, revêt ici une importance sans pareille, tant par la masse de phosphate secondaire élaboré que par la qualité des produits qui en dérivent ⁽¹⁾. De part et d'autre, le point de départ est une roche de très faible teneur en acide phosphorique. Du point de vue théorique se pose un problème qui méritait d'être étudié à fond. Y a-t-il parité, ou non, entre la grande masse de phosphate exploitable et ce que l'on sait de la puissance, de la teneur et de l'extension des roches-mères? On conçoit l'importance de l'argument qu'on en peut tirer pour ou contre la conception à laquelle s'est rallié L. de Launay.

GUANOS.

D'après M. Ledaup, « un navire fut envoyé pour y faire un chargement de guano, dans une île corallienne de l'Océan Pacifique habitée par d'innombrables légions d'oiseaux.

Cette île avait déjà été visitée vingt ans auparavant par le capitaine du même navire. Lors de la première visite, l'équipage avait déblayé un certain espace de terrain et s'y était construit, en bloc de roches coralliennes, un abri qu'il avait recouvert d'une toile à voiles. Au départ, la toile fut enlevée, et le reste laissé en l'état.

Au second voyage, soit vingt ans après, il y avait sur le sol une épaisseur de guano de 20 pouces, soit un pouce (25 millim.) par an. Quant au calcaire sous-jacent, il était transformé en phosphate sur une épaisseur de plusieurs pieds.

⁽¹⁾ Des phosphates en roches de Floride titrant jusqu'à 82 p. 100.

⁽²⁾ Victor WATTEYNE. — Les phosphates de la Floride (*Ann. des Trav. publics*, t. XLIX, 1892, p. 10): Tiré à part.

CHAPITRE VII.

PHOSPHATES DE CHAUX DE FORMATION ACTUELLE OU RÉCENTE.

Dans ce chapitre, j'étudierai successivement :

- 1° *Le phosphate de chaux des sédiments actuels;*
- 2° *Les nodules phosphatés de l'Agulhas Bank.*

1° PHOSPHATES DE CHAUX DES SÉDIMENTS ACTUELS.

Notons une fois pour toutes que les dépôts de phosphate de chaux sont complètement exclus des sédiments d'eau douce, sans doute parce que le milieu lacustre ne se prête pas à la concentration de l'acide phosphorique des organismes. Et ajoutons que l'étude des formations phosphatées des îles coralliennes ne peut trouver place dans le présent travail, du fait qu'elles ne constituent pas, à proprement parler, des dépôts sédimentaires.

Les explorations sous-marines nous enseignent que l'acide phosphorique est incorporé de nos jours aux sédiments sous de multiples formes, telles que « concrétions », ossements de Vertébrés et coprolithes proprement dits, sans compter celui qui gagne le fond avec les nombreuses coquilles et carapaces d'Invertébrés qui en sont quelque peu pourvus. En fait, on l'a découvert dans les mers actuelles presque partout où on l'a cherché, et sa présence est connue dans les différents types de sédiments.

Le tableau suivant, tiré d'analyses publiées par le Challenger dans le volume des Deep-Sea Deposits, fixe l'ordre de grandeur d'une série de teneurs relatives aux dépôts pélagiques et abyssaux, ainsi qu'aux dépôts littoraux d'eau profonde. Aucune documentation n'existe à ma connaissance pour l'ensemble des dépôts littoraux d'eau non profonde, qui sont pourtant les plus accessibles.

DÉPÔTS PÉLAGIQUES ET ABYSSAUX :

- Argile rouge* (27 analyses), 1 = 0, 10 = traces, les autres de 0,19 à 2,09 p. 100.
- Vase à Radiolaires* (3 analyses), 0,65-8,71 p. 100.
- Vase à Diatomées* (3 analyses), 2 = traces, 1 = 0,41 p. 100.
- Vase à Globigérines* (21 analyses), 2 = 0, 7 = traces, 12 = 0,19 — 2,80 p. 100.
- Vase à Ptéropodes* (3 analyses), 1 = traces, 1 = 2,41; 1 = 2,44 p. 100.

DÉPÔTS LITTORAUX D'EAU PROFONDE.

Boue rouge, aucune mention.

Boues bleues, (2 analyses), 1 = traces, 1 = 1,39 p. 100.

Sables verts (1 analyse), traces.

Boues vertes (1 analyse), 0,70 p. 100.

Sables coralliens (1 analyse), 1,42 p. 100 de Al_2O_3 , Fe_2O_3 et P_2O_5 .

Les différences de composition minérale et organique répondant aux écarts de teneur en phosphate de chaux n'ont pas été indiquées.

CONCENTRATIONS DE PHOSPHATE DE CHAUX

DANS LES MERS ACTUELLES SOUS FORME DE NODULES.

A l'encontre du phosphate de chaux qui, à défaut d'analyses chimiques, échappe complètement à nos investigations, tel celui dont il vient d'être question, il existe dans les sédiments actuels du phosphate qui se révèle à nos sens, presque en totalité sous la forme de concrétions⁽¹⁾. A vrai dire, ces concentrations n'ont retenu l'attention qu'à partir de la découverte du gisement de l'Agulhas-Bank, au Sud du Cap de Bonne Espérance. L'événement était particulièrement heureux, car de l'étude des conditions de milieu favorables à la genèse d'innombrables nodules, on espérait tirer les éléments d'une théorie rationnelle de la formation des phosphates sédimentaires. Cet espoir ne s'est pas réalisé, parce que tout porte à croire, comme nous le verrons bientôt, que le gisement de l'Agulhas Bank ne date, ni d'aujourd'hui, ni d'hier.

Les concentrations de phosphate de chaux, qui gisent sur le fond de la mer, à l'état de nodules, ont été attribuées, à tort ou à raison, à l'époque actuelle. En l'état de nos connaissances, il me paraît logique de les grouper en deux catégories :

1° Les concrétions phosphatées draguées en de multiples points par le *Challenger* et le *Blake*, réserve faite pour celles de l'Agulhas Bank, au Sud du Cap de Bonne-Espérance.

2° Les nodules phosphatés de l'Agulhas-Bank.

1° CONCRÉTIONS PHOSPHATÉES AUTRES QUE CELLES DE L'AGULHAS-BANK.

a. *Nodules dragués par le Blake*⁽²⁾. — Des nodules phosphatés ont été découverts par le *Blake* (1877-1879), notamment, dans le golfe du Mexique, dans le détroit de Floride, et au large des

⁽¹⁾ L'exception vise la concentration d'une très petite quantité de phosphate de chaux fréquemment observée, en association avec la glauconie dans les coquilles de Foraminifères des bancs et sables verts, ainsi que dans des concrétions à l'état de grains.

⁽²⁾ J. MURRAY. — Report on the Specimens of bottom deposits (Croisière du *Blake*, dans l'Atlantique, 1877-1879) [*Bull. Mus. Comp. Zoology*, vol. XII, 1885-1886, p. 37-61].

A. AGASSIZ. — *Three Cruises of the Blake*, vol. I, 1888, p. 275-276 et p. 281-282.

côtes des États-Unis, entre le Cap Hatteras et 31° 48 de lat. N. La plupart de ces concrétions ont été draguées sur le passage du Gulf-Stream, ou le long de son bord interne, et toutes sont subordonnées à des bancs et sables verts. En général, elles contiennent plus de 50 p. 100 de phosphate de chaux.

A la station 317, par 31° 57' de lat. N. à la profondeur de 333 br. (599 m.)⁽¹⁾, Le Blake a dragué, reposant sur un fond dur, une concrétion de forme très irrégulière, mesurant environ 9 pouces de plus grand axe (environ 12 centim. 8). L'échantillon est incrusté de *Spongiaires*, de *Coraux* et d'*Annélides*, et il emprisonne 2 dents de *requin*. D'aspect bréchoïde, il renferme de nombreux restes de *Foraminifères* pélagiques et autres, des *Ptéropodes*, des débris d'*Echinides*, de petits fragments de quartz, de feldspath, etc. «L'élément le plus caractéristique est formé de petits grains arrondis, de couleur brune ou vert jaune, ressemblant beaucoup à la glauconie, qui est également présente. Des réactions chimiques montrent que ces grains sont phosphatés.» D'après J. Murray, «ils sont similaires aux grains trouvés dans les nodules dragués au large du Cap de Bonne-Espérance, et ailleurs par le *Challenger*, et identiques dans leurs propriétés physiques et chimiques aux grains phosphatés des roches crétacées.»⁽²⁾ Lesdits grains sont quelquefois inclus dans du manganèse, et même cette matière les envahit pour y former des dendrites ou des concrétions. Un fragment du nodule, analysé par Klement, du Musée royal d'Histoire naturelle de Bruxelles, a donné :

Acide phosphorique.....	23,53 p. 100
Acide carbonique.....	15,56 —
Acide sulfurique.....	2,29 —
Fluor.....	2,28 —
Chlore.....	0,16 —
Chaux.....	52,15 —
Magnésie.....	1,01 —
Résidu insoluble.....	0,52 —
Perte au feu.....	3,15 —
	100,65 —

Cette composition, qui correspond à 51,36 p. 100 de phosphate de chaux, est remarquable par la teneur en fluor, exceptionnellement élevée pour un phosphate de formation récente ou actuelle, et par le rapport $\frac{Fl}{P^{104}}$, qui atteint près de 1/10. D'autre part, l'inclusion de grains de phosphate différencie la concrétion de tous les nodules albiens et de ceux des sables verts en particulier, dont tout le phosphate est fixé dans la gangue. La nature de celle-ci n'a pas été indiquée pour la concrétion étudiée. Eu égard à la composition organique et minéralogique du rognon et à sa teneur élevée en phosphate, il y a tout lieu de supposer qu'elle est pour le moins en majeure partie phosphatée.

⁽¹⁾ J. MURRAY, *op. cit.* vol. I, p. 276, fig. 189.

⁽²⁾ JOHN MURRAY. — Report on the Specimens of bottom deposits (Report on the Results of dredging, under the supervision of Alexander Agassiz, in the Golfe of Mexico (1877-1878) by the U.-S. coast steamer «Blake» [*Bull. Mus. Comp. Zoology*, at Harvard College, vol. XII, n° 2, 1885, p. 43].

L'étude des nodules phosphatés est extrêmement instructive, à la condition de les comparer aux dépôts dans lesquels ils gisent, cette mise en parallèle imposant presque toujours la conclusion qu'ils ont été remaniés. Pareille comparaison est malheureusement impossible pour la concrétion draguée par *le Blake*, en raison de notre ignorance de la composition détaillée du sédiment sur lequel elle repose. Par son faciès aberrant, qui lui imprime un caractère archaïque, elle évoque l'idée d'une formation lente et d'un séjour prolongé, à l'état libre, au fond de la mer, dans un milieu où la sédimentation est interrompue ou troublée par des courants.

b. *Nodules dragués par le Challenger*. — On doit à la croisière du *Challenger* la découverte de nodules phosphatés sur l'Agulhas Bank, les côtes du Japon, d'Australie, du Chili, entre les îles Falkland et l'embouchure de la Plata et sur les côtes d'Espagne⁽¹⁾. Des concrétions phosphatées ont été signalées également au Nord du Pacifique par Alexandre Agassiz.

D'après J. Murray et A.-F. Renard⁽²⁾, ces concrétions se rencontrent à la fois dans tous les dépôts terrigènes et dans les sédiments pélagiques qui reçoivent des matériaux de la terre ferme, et jusqu'en bordure de la zone abyssale. Autrement dit, leur distribution dans l'espace est extrêmement vaste. Mais c'est principalement à proximité des côtes qu'elles ont été draguées, et plus particulièrement dans les bancs et sables verts qui constituent le principal milieu générateur.

Au témoignage de J. Murray et A.-F. Renard, les nodules mesurent couramment 3 centimètres de plus grand diamètre, et, par exception, ils atteignent 4-6 centimètres. Leur forme est sujette à d'infinies variations : ils sont arrondis, quelquefois anguleux, ornés de protubérances, mamelonnés, creusés de perforations plus ou moins profondes, et non moins durs que les nodules des boues et sables verts albiens⁽³⁾.

Il m'est impossible de dire dans quelle mesure cette diagnose s'applique aux concrétions, autres que celles de l'Agulhas Bank rapportées à l'époque actuelle par les deux auteurs.

La ressemblance de ces nodules avec ceux des sables verts, craies glauconieuses et craies pures, est si évidente que les auteurs se sont demandés si les concrétions analysées par eux n'ont pas été empruntées à d'anciennes formations, mises à nu sur le fond de la mer. A leur avis, l'hypothèse en doit être rejetée, du fait que ces concrétions renferment des particules minérales et des restes organiques, identiques à ceux des sédiments dans lesquels elles sont incluses. Il en résulte qu'elles ont dû prendre naissance *in situ*.

La parenté des nodules décrits par J. Murray et A.-F. Renard avec ceux des formations anciennes est l'évidence même. Toutefois, il importe d'observer que les nodules provenant des stations 141, 142 et 143 qui, seuls, ont été figurés, proviennent de l'Agulhas Bank ou de sa bordure. Si les affinités en question sont fondées uniquement sur la mise en parallèle des nodules de ce gisement et de ceux des terrains anciens, il se peut que la parenté observée ne s'étende pas à la totalité des concrétions de formation actuelle ou très récente. Cette réserve s'inspire

(1) L.-W. COLLET. — Les dépôts marins, 1908, p. 195.

(2) J. MURRAY and A.-F. RENARD. — Deep Sea Deposits (*Rep. of the scient. Results of the exploring Voyage of H. M. S. Challenger*, 1873-1876 [1891], p. 391 et 397).

(3) J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 391.

de ce que nous savons maintenant de l'âge du gisement de l'Agulhas Bank, question sur laquelle toute notre attention va se porter derechef.

Dans les quelques pages qu'ils ont consacrées à l'analyse des nodules dragués par le *Challenger*, J. Murray et A.-F. Renard ont caractérisé des concrétions réalisant au microscope deux types profondément dissemblables.

Au premier se rapportent des concrétions subordonnées aux boues et sables verts, et comme eux essentiellement formés de grains de glauconie, de quartz et accessoirement de feldspath, que cimente du phosphate de chaux amorphe⁽¹⁾. Cette constitution est la seule qui puisse être comparée à celle des nodules albiens du Bassin de Paris, comparaison qui est loin d'entraîner l'identité des milieux générateurs.

Le second type, qui concentre, à peu près à lui seul, tout l'intérêt que présentent, à notre point de vue, les concrétions phosphatées des sédiments actuels, a pour représentants des rognons phosphatés, subordonnés aux vases à Globigérines d'eau profonde. Des concrétions, draguées au Sud de l'Océan Indien, par 1.900 brasses (3.475 m.), tirent leur caractéristique fondamentale de l'abondance des restes organiques, surtout de Rhizopodes calcaires et de la prépondérance de la matière phosphatée.

Une analyse, relative aux concrétions de la station 143 a donné :

P ² O ⁵	23,54 p. 100
CO ²	10,64 —
SO ³	1,39 —
SiO ²	2,56 —
CaO.....	40,95 —
MgO.....	0,83 —
Fe ² O ³	2,79 —
Al ² O ³	1,43 —
Pertes.....	3,65 —
Résidu insoluble.....	11,93 —
	99,71 —
Phosphate de chaux.....	51,38 p. 100 ⁽²⁾

Un second échantillon provenant de la même station renferme 49,57 p. 100 de phosphate de chaux.

J. Murray et A.-F. Renard ont figuré des nodules du Sud de l'Océan Indien répondant à trois stades de minéralisation : Le premier⁽³⁾ procède d'une vase à *Globigérinidae* et *Pulvinidae*, en grande partie minéralisée, dont le phosphate pénètre dans tous les espaces vides des Foraminifères, et pseudomorphose incomplètement des coquilles. Le deuxième⁽⁴⁾, caractérisé par une minéralisation plus avancée, montre presque tout le carbonate de chaux des organismes transformé en

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 393 et pl. XX, fig. 1.

⁽²⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 392.

⁽³⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, pl. XX, fig. 2.

⁽⁴⁾ *Ibid.*, *id.*, pl. XX, fig. 3.

phosphate de chaux concrétionné. Et le dernier⁽¹⁾ trahit une phosphatisation généralisée de la roche, entraînant l'effacement de la totalité des structures organisées, au point que tout le champ du microscope se signale par une structure concrétionnée.

Il y a donc, à la fois, substitution complète au carbonate de chaux de la gangue et des Foraminifères, effacement des caractères organiques et développement d'une structure zonaire généralisée, consécutive de la cristallisation du phosphate de chaux. Rien de pareil n'a été observé, ni dans les concrétions de l'Agulhas Bank, ni dans les phosphates des formations sédimentaires anciennes.

Il résulte de ces constatations que *la phosphatisation des nodules dragués, en eau profonde, dans l'Océan Indien, aboutit à la destruction de toutes les structures organisées, lorsqu'elle est poussée à fond*. L'intérêt de ce fait a ressorti de la comparaison qui va suivre.

Comparaison des concrétions phosphatées des mers actuelles et des nodules des formations sédimentaires anciennes, au point de vue de l'état de conservation des micro organismes⁽²⁾. Veut-on trouver dans la série sédimentaire ancienne des nodules à mettre en parallèle avec ceux de la vase à Globigérines, il faut les chercher dans les vases à Foraminifères, consolidées à l'état de craies, et tout particulièrement dans les craies phosphatées. La comparaison des uns et des autres met en évidence des différences de constitution très profondes.

Si l'on envisage le cas très général, la règle est que les restes organiques des craies phosphatées et des nodules qui leur sont associés soient parfaitement conservés. Encore convient-il d'ajouter que cet état de conservation n'est pas spécial aux anciennes vases à Foraminifères phosphatisées. Les nodules phosphatés du Culm des Pyrénées, englobant des Radiolaires de constitution très fragile (I., p. 62 et Pl. III, fig. 9) et ceux des phosphates nord-africains, pétris de restes de microplankton, notamment de Diatomées (II, p. 457 et Pl. XXIII fig. 70), accusent un état de conservation des micro-organismes qu'on peut qualifier d'admirable. Les exceptions à cette règle se comptent et ne sont pas à retenir ici. De ce nombre sont, par exemple, certains nodules dinantiens des Pyrénées dont les Radiolaires sont devenus méconnaissables sous l'influence de la silice et d'une substance carbonneuse faisant figure de matière colloïde, c'est-à-dire grâce à des interventions auxquelles le phosphate de chaux reste étranger (I, p. 65, Pl. III, fig. 10 et Pl. IV, fig. 11).

Dès 1897, j'ai conclu de l'étude sommaire des craies phosphatées du Bassin de Paris que l'épiginie même partielle d'une ancienne vase à Foraminifères, par le phosphate de chaux, a pour conséquence la conservation de nombreuses coquilles détruites en dehors des plages minéralisées⁽³⁾. Les progrès de nos connaissances aidant, on peut aujourd'hui attribuer une portée générale à cette observation, et dire que d'un bout à l'autre de la série sédimentaire ancienne,

(¹) J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, pl. XX, fig. 4.

(²) L. CAYEUX. — Enseignements tirés de la comparaison des concrétions phosphatées des mers actuelles et des nodules, des formations sédimentaires anciennes (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXI, 1940, p. 496).

(³) L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. Géol. Nord*, t. IV, 2, 1897, p. 480-483).

le phosphate de chaux joue, par rapport aux micro-organismes tant calcaires que siliceux un rôle éminemment conservateur.

A cette loi, le phosphate de chaux du Sud de l'Océan Indien fait exception. En sorte que *le phosphate, qui conserve dans la perfection les micro-organismes des mers anciennes, est susceptible de les détruire complètement dans les mers actuelles*. Il en résulte que, dans le domaine envisagé, ce sont les dépôts de l'époque actuelle qui enregistrent les transformations les plus profondes. C'est un nouveau motif de croire que bien des erreurs ont été commises au temps où il était de mode d'attribuer à des actions très tardives toutes les modifications de composition et de structure subies par les anciens sédiments. Tel fut le cas, pour la concentration de la silice organique, sous la forme de silex, sur le fond de la mer et non pendant et après l'émergence de la craie, comme on l'a enseigné durant plus d'un demi-siècle. Tout bien considéré, l'analyse des concrétions phosphatées des vases à Globigérines de l'Océan Indien apporte un nouveau et précieux argument en faveur de l'idée, si souvent exprimée dans mes travaux antérieurs, que le *milieu sous-marin joue un rôle capital dans les transformations subies par les sédiments après leur dépôt*.

FORMATION IN SITU DES CONCRÉTIONS PHOSPHATÉES DES MERS ACTUELLES. — Les nodules phosphatés des sédiments anciens diffèrent encore, du moins pour une fraction très importante, sur un point essentiel de leur histoire, des concrétions rapportées à l'époque actuelle. J. Murray et A.-F. Renard⁽¹⁾ ont conclu de l'examen des concrétions draguées par le *Challenger* que les particules minérales et les restes organiques qu'elles renferment sont identiques à ceux des sédiments dans lesquels elles gisent. Et les deux auteurs d'affirmer, en conséquence, que ces concrétions ont été engendrées *in situ*. Pour éviter toute ambiguïté, il importe de préciser que J. Murray et A. F. Renard, en formulant cette conclusion, entendent rejeter toute idée de remaniement de nodules empruntés à des formations géologiques plus anciennes. Mais de remise en mouvement, aux dépens des sédiments dans lesquels gisent les concrétions en question, ni J. Murray et A.-F. Renard, ni d'autres savants n'en ont envisagé l'éventualité.

Les observations relevées au cours de l'étude des nodules de phosphate de chaux des mers anciennes nous les représentent comme toujours remaniés, à de très rares exceptions près, soit dans le dépôt même dont ils dérivent, soit dans un sédiment bien différent de celui qui les renferme. A cet égard, l'analyse des phosphates albiens, cénomaniens et sénoniens du Bassin de Paris (I, p. 150-152, 183-186 et 213) fournit matière à des constatations qu'il est difficile d'imaginer plus démonstratives⁽²⁾. Et ce ne sont pas les seuls, à beaucoup près, dont l'analyse impose un pareil enseignement.

De l'étude comparée des concrétions phosphatées de l'époque actuelle et des nodules phosphatés des périodes passées, il ressort, une fois de plus, et avec évidence, que *les phénomènes actuels sont loin d'être l'image fidèle des phénomènes anciens*.

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 397. — L.-W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 200.

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Remaniement sous-marin des nodules phosphatés de l'Albien du Bassin de Paris (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXCVII 1933, p. 1076)

Ibid. — Les anomalies de structure et de composition des phosphates albiens du Bassin de Paris et les enseignements qui en découlent (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCX, 1937, p. 1021).

PHOSPHATES EN GRAINS SUBORDONNÉS AUX CONCRÉTIONS. — L'élément essentiel des grands gisements, c'est-à-dire le grain phosphaté, paraît manquer presque complètement dans les mers actuelles. A son défaut, on se trouve privé d'une source de lumière, d'importance fondamentale, pour éclairer les conditions de genèse des phosphates en grains des dépôts anciens. Sur ce point, je ne connais que deux brèves mentions, qui ne laissent rien entrevoir du mécanisme de la formation des éléments.

1° Ainsi que je l'ai noté plus haut (p. 814), J. Murray a signalé l'existence, dans sa description du nodule dragué par le *Blake*, de petits grains arrondis, identiques dans leurs propriétés physiques et chimiques aux phosphates en grains des roches crétacées. On ne sait rien de plus à leur sujet.

2° Dans leur description des nodules dragués au Sud de l'Océan Indien dans la vase à Globigérines, J. Murray et A.-F. Renard ⁽¹⁾ ont observé des Foraminifères remplis de phosphate et pourvus d'une coquille phosphatisée, le tout ayant servi de centre d'attraction à du phosphate qui s'est fixé à la surface. De cette concentration résulte la formation d'éléments qui ne sont pas sans importance, aux yeux des auteurs, pour l'explication des phosphates en grains. En réalité, il s'agit d'un processus différent de celui qui a engendré les grains des craies phosphatées, et *a fortiori* ceux des phosphates nord-africains, dans lesquels le remplissage des coquilles ne joue pour ainsi dire aucun rôle. Ceux de la craie ont pris naissance en liberté, pour être ensuite remaniés et rassemblés par des courants (I, p. 210), alors qu'en l'espèce, l'élément phosphaté, fût-il construit sur le même modèle que l'autre, se développe *in situ*.

CONCLUSIONS. — L'étude de la totalité des concrétions phosphatées, draguées jusqu'à présent, constituerait un sujet de grand intérêt pour la géologie, si les données relatives à leur gisement n'étaient des plus incomplètes.

C'est l'évidence même que jusqu'à présent les nodules de l'Agulhas Bank ont fourni, à eux seuls, presque toutes les données réunies en matière de phosphates sédimentaires, rapportés aux temps actuels. Si les arguments que nous allons bientôt invoquer pour les rayer des formations actuelles sont recevables, nos connaissances sur les concrétions phosphatées en voie de formation sont tellement réduites, qu'en vain nous leur demanderons la solution du problème des grandes accumulations phosphatées du passé.

Peut-être l'enseignement tiré par John Murray des variations de température des eaux à la surface des Océans est-il de nature à justifier l'attribution à l'époque actuelle des nodules autres que ceux de l'Agulhas Bank. Rappelons que, d'après ce savant, *les concrétions phosphatées ont été draguées partout où la température des eaux superficielles est sujette à de grands écarts, entraînant une importante destruction d'organismes* ⁽²⁾.

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 395 et pl. xx, fig. 3.

⁽²⁾ J. MURRAY. — On the annual range of temperature in the surface waters of the Ocean and its relation to other oceanographical phenomena (*Geogr. Journ.*, 1898, p. 113).

L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées, in *Les dépôts marins*, 1908, p. 194-195.

Du point de vue général, le fait en soi que l'intervention de sérieux écarts de température peut entraîner une hécatombe d'organismes, et partant la concentration de phosphate de chaux d'origine organique, est sans grande portée. Mais il offre l'avantage de nous enseigner que *la genèse des nodules phosphatés ne résulte pas d'une sédimentation normale, et qu'elle implique une façon de rupture d'équilibre, changeant les conditions de milieu*, même lorsqu'il s'agit de donner naissance à quelques concrétions. Telle est, croyons-nous, l'idée directrice à dégager de cette étude. Nous verrons bientôt qu'ainsi formulé, l'enseignement principal tiré de la considération des concrétions phosphatées, rapportées à l'époque actuelle, va s'intégrer tout naturellement à la conclusion générale, dictée par l'analyse des phosphates élaborés au cours des temps géologiques.

2° LES NODULES PHOSPHATÉS DE L'AGULHAS BANK.

(Pl. LI, fig. 162 et 163).

Au cours de sa mémorable croisière de 1873-1876, le *Challenger*, le premier, a découvert des nodules de phosphate de chaux au fond des mers actuelles, en explorant l'Agulhas Bank, au Sud du Cap de Bonne-Espérance. Puis les expéditions allemandes de la *Gazelle* et de la *Val-*

NUMÉRO des STATIONS.	REPÉRAGE DES POINTS DE SONDAGE.	DISTANCES à la CÔTE.	PROFONDEURS.	
1	Lion's Head S. 82° E.....	27 milles = 50 km.	125 br.	229 m.
2	Lion's Head N. 63° E.....	34 — = 63 km.	154 br.	282 m.
3	Vasco de Gama-Peak N. 71° E.....	18 — = 33 km, 4.	230	421
4	Hang Berg N. 3/4 E.....	29 — = 53 km, 8.	48	88
5	Cape Saint-Blaize N. X. E. 3/4 E.....	73 — = 135 km, 4.	105	192
6	Cape Point N. 41° E.....	38 — = 33 km, 4.	315-400	576-731
7	Cape Point N. E. 3/4 N°.....	39 — = 72 km, 3.	560	1.024
8	Cape Point N. E. X. E. 3/4 E.....	28 — = 52 km.	300	549
9	Lat. 36° 34' S. Long. 21° 32' E.....	" "	240	439
11	Vasco de Gama (Échantillon de L. M. W. Collet, P. F. stat. XI).	25 km.	166	304

NOTE. — Lion's Head est une partie de la Table Mountain, le Cap Hang Berg se trouve au Cap Hangklip, sur le côté Est de False Bay.

divia, et surtout des recherches du département de l'Agriculture du Cap ont fourni de nombreux matériaux d'étude sur ce domaine.

Une description des nodules, recueillis par le *Challenger*, a été faite par J. Murray et A.-F. Renard⁽¹⁾. A ces mêmes nodules L.-W. Collet⁽²⁾ a consacré une analyse très détaillée. Enfin, Sir John Murray et le professeur E. Philippe⁽³⁾ ont fait connaître les caractères des concrétions draguées par le *Valdivia*.

Somme toute, si l'on a dragué des concrétions phosphatées, en nombre de points, il semble bien qu'on n'ait découvert, jusqu'à présent, qu'une seule accumulation susceptible d'être qualifiée de gisement, sans abus de langage, celle de l'Agulhas Bank. A cette raison pour lui prêter une attention particulière, s'en ajoute une autre, le très grand intérêt qu'il présente au point de vue théorique. Grâce à l'heureuse intervention du D^r A. Rogers, alors Directeur du Service géologique de l'Union Sud-Africaine et à l'extrême obligeance du D^r L. Gill, Directeur du Musée sud-africain au Cap, à qui j'exprime ma vive reconnaissance, j'ai eu la bonne fortune d'étudier des échantillons de nodules phosphatés, dragués, il y a longtemps, par le gouvernement du Cap, sous la direction de feu le D^r Gilchrist.

Bien que les résultats de mes recherches aient été publiés en 1932⁽⁴⁾, et surtout en 1934⁽⁵⁾, je crois nécessaire de reproduire ici, presque *in extenso*, la note détaillée qui leur a été consacrée.

Les matériaux analysés proviennent de neuf stations différentes s'échelonnant de 48 brasses (88 m.) à 560 brasses (1.024 m.). En voici le tableau, (p. 819) pour le cas où mes observations seraient vérifiées à un moment donné.

A ces matériaux, j'ai pu ajouter un nodule de grand intérêt, dragué à la profondeur de 166 brasses (304 m.), à la station 11 (Vasco-de-Gama), qui m'a été donné par M. L.-W. Collet (voir carte).

Les nodules recueillis par le *Challenger* viennent de deux régions très différentes. Les uns ont été prélevés à 98 brasses (179 m.) et à 150 brasses (274 m.), sur le bord externe de l'Agulhas Bank et les autres à 1.900 brasses (3.475 m.) en eau très profonde, par conséquent, à près de 100 milles (185 kilom. 5) au Sud-Est dudit banc.

Ceux qui ont été envoyés au Challenger Office par le D^r J.-D.-F. Gilchrist, et étudiés par L.-W. Collet, ont été recueillis à des profondeurs comprises entre 80 brasses (146 m.) et 800 brasses (1.460 m.).

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — Deep Sea Deposits (*Report of the scientific Results of the exploring Voyage of H. M. G. Challenger*, 1891. Phosphatic Concretions, p. 391-400, pl. xx, fig. 1).

⁽²⁾ L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas-Bank (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXV, 1905, p. 862-893).

Ibid. — Les dépôts marins, 1908. *Les concrétions phosphatées*, p. 194-213.

⁽³⁾ Sir JOHN MURRAY and Prof. E. PHILIPPI. — Die Grundproben der Deutschen Tiefsee-Expedition, 1898-1899. Bd. XX, 1908, p. 181-187, pl. XXII.

⁽⁴⁾ L. CAYEUX. — Interprétation des dépôts de phosphate de chaux dragués sur l'Agulhas Bank au Sud du Cap de Bonne-Espérance (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXCIV, 1932, p. 926).

⁽⁵⁾ *Ibid.* — The phosphatic nodules of the Agulhas Bank (A Study of submarine Geology) [*Annals of the South African Museum*, vol. XXXI, 1934, Part. 1, p. 105-136, pl. XXXII-XXXI].

CARACTÈRES EXTERNES DES NODULES. — Les matériaux fournis par l'Agulhas Bank et ses abords se signalent immédiatement à l'attention par une morphologie très particulière, rarement comparable à celle des rognons de nos sables verts albiens. De forme extrêmement variable dans le détail, mais généralement arrondis et parfois très anguleux (Pl. LI, fig. 164-165), les nodules sont irréguliers, mamelonnés, ornés de protubérances, voire même profondément échancrés et, d'après L.-W. Collet, perforés de nombreuses cavités. Certains de mes échantillons accusent un aspect tuberculeux et scoriacé. L'un d'eux, tranché par le milieu, montre des cavités irrégulières, en forme d'entonnoir, atteignant le centre, et représentant de un quart au tiers du volume total.

Ces nodules, représentatifs du gisement, je ne sais dans quelle mesure, se répartissent en deux catégories : la plupart sont caractérisés par des formes irrégulières, avec des teintes qui vont du gris noirâtre au noir clair; les autres sont franchement anguleux et colorés en jaune brunâtre. Les premiers sont mats d'aspect, et les seconds ont une apparence polie et vernissée, remarquablement accusée. Pour tout dire, les uns ressemblent à des concrétions tandis que les autres évoquent l'idée de roches fragmentaires remaniées. Celles-ci, creusées, sur une seule face, de cavités susceptibles de mesurer 2 centimètres de diamètre et 1 centimètre de profondeur, montrent, en outre, du même côté, de toutes petites perforations ressemblant à des cupules, larges de 2 millimètres et remplies de glauconie. Ces différences de faciès ne paraissent nullement fonction des conditions bathymétriques du milieu où les nodules ont été dragués. Pour fixer les idées à cet égard, notons que les teintes les plus claires (jaune brunâtre) sont réalisées aux profondeurs de 105 brasses (192 m.) et de 230 brasses (421 m.), alors que les nodules noirâtres ont été dragués de 154 brasses (281 m.) à 400 brasses (731 m.). Quant aux rognons d'apparence scoriacée, je ne puis dire qu'une chose, c'est que le plus typique de mes échantillons, à ce point de vue, vient de la plus grande profondeur, soit 560 brasses (1.024 m.).

Beaucoup de nodules portent des incrustations de nature organique, déjà signalées par L.-W. Collet, qui a identifié des *Coraux*, des *Bryozoaires*, des *Annélides*, des *Alcyonaires*, des *Eponges* et des *Foraminifères*, avec cette particularité intéressante, qu'il ne m'a pas été donné d'observer que les incrustations peuvent fixer la position des concrétions sur le fond de la mer et leur degré d'enfouissement. Une partie, brillante et noire, correspond à l'épaisseur engagée dans le sédiment, et une autre, grise, aux incrustations définissant la zone supérieure dégagée de la vase. Les incrustations visibles sur mes matériaux d'étude, dues principalement aux *Bryozoaires*, s'observent, tantôt sur toute la surface — preuve que les nodules ont été retournés en tous sens — et tantôt sur une partie seulement. Plusieurs en sont dépourvus.

D'après J. Murray et A.-F. Renard, les dimensions des concrétions varient le plus souvent de 1 à 3 centimètres et atteignent exceptionnellement de 4 à 6 centimètres. Pour L. W. Collet, elles sont généralement comprises entre 5 et 10 centimètres. La plus grosse, draguée vers 111 brasses (304 m.), à 25 kilomètres de la côte (station 11, Vasco-de-Gama), mesure 23 × 16 × 12 centimètres. Le plus volumineux de mes échantillons ne dépasse pas 7 centim. 5 de plus grand diamètre.

Il résulte des descriptions et figures données par L. Collet, Sir John Murray et le professeur E. Philippi que les nodules sont libres, ou cimentés de manière à former un véritable conglomérat.

Autant que je puisse en juger par les brèves indications fournies sur la gangue des nodules, celle-ci est constituée par des sables verts plus ou moins consolidés.

Ces derniers auteurs ont représenté un curieux groupement de nodules perforés⁽¹⁾ témoignant qu'ils peuvent être nombreux au point de se toucher.

Il importe de noter ici que, dans toutes leurs façons d'être, les nodules ont acquis la consistance des rognons les plus durs de l'Albien du Bassin de Paris.

COMPOSITION CHIMIQUE DES NODULES. — J. Murray et A.-F. Renard ont publié l'analyse suivante de concrétions draguées à la station 142, par 150 brasses (274 m.), sur le bord de l'Agulhas Bank⁽²⁾.

P ² O ⁵	19,96 p. 100
CO ²	12,05 —
SO ³	1,37 —
SiO ²	1,36 —
CaO.....	39,41 —
MgO.....	0,67 —
Fe ² O ³	2,54 —
Al ² O ³	1,19 —
Pertes.....	(1)
Résidu insoluble.....	17,34 —
	95,89 —
Phosphate de chaux.....	43,57 p. 100

Une analyse de nodule par la Valdivia⁽³⁾ a donné :

SiO ²	26,70 p. 100
Ca ³ (PO ⁴) ₂	36,37 —
CaCO ³	10,53 —
CaSO ⁴	11,26 —
MgCO ³	4,67 —
Fe ² O ³	5,34 —
Al ² O ³	7,51 —
	102,38 p. 100

Deux analyses de nodules jaunes, faites par L.-W. Collet, accusent respectivement 37,79 et 46,69 p. 100 de phosphate de chaux, et 21,09 puis 23,70 p. 100 de Fe²O³. Deux autres échantillons, étudiés par le même auteur, et tirés d'une seule et même station, renferment 48,70 et 52,05 p. 100 de phosphate de chaux⁽⁴⁾.

(1) Sir John MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, pl. XXII, fig. 1.

(2) J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 392-3.

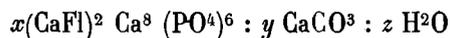
(3) Sir J. MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, p. 185.

(4) L. W. COLLET, Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank (*Proc. roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXV, 1905, p. 868 et 870)

Trois échantillons, que j'ai fait analyser, sans doser la totalité des éléments en présence ⁽¹⁾, sont caractérisés par les compositions suivantes :

	DRAGUÉ À 560 BRASSES 1.024 mètres Cape Point. (7)	DRAGUÉ À 300 BRASSES 549 mètres Cape Point. (8)	DRAGUÉ À 166 BRASSES 304 mètres Vasco de Gama. (11)
SiO ²	17.20	21.90	13.60
Al ² O ³	3.00	3.00	2.10
Fe ² O ³	6.25	6.25	6.30
Ca O.....	37.20	31.70	38.40
Mg O.....	1.16	1.80	1.44
P ² O ⁵	19.36	18.47	18.60
Fl.....	1.19	0.97	1.35
Cl.....	0.25	0.24	0.32
CO ²	8.14	4.20	7.93
H ² O.....	5.75	7.20	6.50
	99.50	95.73	96.54

La composition de ces trois nodules fait supposer que le phosphate de chaux est une colophanite fluorée (*fluocolophanite*), minéral auquel A. Lacroix attribue une formule susceptible de varier ⁽²⁾.



De cette composition on peut inférer que du point de vue chimique, les nodules de l'Agulhas Bank se rattachent au groupe des phosphates de la série sédimentaire ancienne.

Ces analyses accusent une remarquable concordance avec celles de J. Murray et A.-F. Renard, de Sir John Murray et E. Philippi, au point de vue de la teneur en phosphate de chaux. Les dosages de L.-W. Collet, caractérisés par les teneurs de 46,69, 48,70 et 52,05 p. 100 de phosphate de chaux, tout en témoignant d'une amélioration sensible, n'infirmen en rien la conclusion à tirer des autres essais, à savoir que les nodules de l'Agulhas Bank rentrent dans la catégorie des phosphates pauvres.

Je souligne, sans y insister, le fait que les titres en acide phosphorique sont du même ordre que ceux des sables verts albiens du Bassin de Paris.

⁽¹⁾ En particulier, les alcalis devraient figurer en proportion élevée dans l'analyse complète des nodules des stations 8 et 11, par suite de la fréquence de la glauconie.

⁽²⁾ A. LACROIX, (*Minéralogie de la France*, t. IV, 1890, p. 561).

CONSTITUTION MINÉRALOGIQUE ET ORGANIQUE.

Données bibliographiques. — 1° J. Murray et A.-F. Renard ont décrit et figuré deux types de concrétions : les unes, subordonnées aux sables verts de la station 142 du Challenger, draguées à 150 brasses (274 m.), se résolvent en agrégats, formés de minéraux dans la proportion de deux tiers au maximum, comprenant de la glauconie, du quartz et des «silicates», cimentés par des phosphates de chaux, le tout en l'absence d'organismes⁽¹⁾. Les autres, subordonnés à la vase à Globigérines et ramenés d'une profondeur de 1.900 brasses (3.475 m.) [station 143] renferment des Foraminifères prépondérants⁽²⁾. Leur gisement étant indépendant de l'Agulhas Bank, je les laisse provisoirement de côté non sans avoir fait ressortir l'extraordinaire dispersion bathymétrique des nodules en question.

2° L'étude détaillée de L.-W. Collet⁽³⁾ nous enseigne que, parmi les minéraux des concrétions le quartz figure en première ligne, puis viennent les feldspaths détritiques, principalement basiques, la glauconie sous la double forme de grains bien définis et de pigment, et le phosphate de chaux, jouant le rôle de ciment et imprégnant la calcite des coquilles.

Elle nous apprend encore que la plupart des nodules contiennent des restes d'organismes calcaires, dont «la calcite est pseudomorphosés en phosphate de chaux».

3° J. Murray et E. Philippi⁽⁴⁾ ont reconnu deux sortes de nodules : les uns, avec Foraminifères, ou au tres organismes, au nombre desquels les types calcaires abondent. En fait d'organismes, ils ont mentionné l'existence de *Foraminifères*, pélagiques et benthiques, des fragments d'*Echinodermes*, des *Bryozoaires*, *Coraux*, *Hydrozoaires*, *Coccolithes* et des spicules d'*Eponges*. Les autres, privés d'organismes calcaires et riches en glauconie et minéraux clastiques que cimente la matière phosphatée.

DIAGNOSTIC DES PRINCIPAUX TYPES DE NODULES. — Il s'agit, bien entendu, des principales variétés qui m'ont été adressées, lesquelles ne sont peut-être pas représentatives de la totalité du gisement. J'en ai reconnu six qui vont être définies brièvement, avec le dessein de les envisager ensuite dans leur ensemble.

1° *Nodules calcaréo-phosphatés très quartzeux* [n° 1, 125 br. (229 m.), Lion's Head et n° 8, 300 br. (549 m.), Cape Point. (Pl. LII, fig. 166)]. — Nodules noirâtres, les plus riches de toute la série en matériaux détritiques. De taille très uniforme et ne dépassant guère 0 millim. 05 de diamètre (n° 8), les grains de quartz (a) sont inégalement répartis dans l'étendue restreinte d'une section, dont ils forment le tiers, la moitié et même davantage. En moyenne, ils repré-

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, pl. xx, fig. 1.

⁽²⁾ ³ *Ibid.*, *Op. cit.*, pl. xx, fig. 2, 4.

⁽³⁾ L. W. COLLET, *Les dépôts marins*, 1908, p. 200-201.

⁽⁴⁾ Sir John MURRAY and prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, p. 181 et taf. XXII (VII).

sentent moins de 50 p. 100 du dépôt. Au rebours de ce qui se passe dans les nodules de sables verts, décrits par J. Murray et A.-F. Renard, la glauconie (*b*) peut être rare, au point qu'on en compte tout au plus quelques dizaines de petits grains par préparation. Dans d'autres nodules, le minéral est clairsemé. Quant à la faune elle est surtout caractérisée par la présence de quelques *Globigérines* (*c*). Très peu développée, la gangue (*d*) est calcaréo-phosphatée.

Comme on le voit, la roche est bien loin de réaliser les caractères d'un sable vert typique.

2° *Nodules phosphatés ou calcaréo-phosphatés, très glauconieux à Globigérines*, n° 4, 48 brasses (88 m.) Hang Berg, n° 3, 230 br. (421 m.) et n° 7, 560 br. (1.024 m.), Cape Point (Pl. LII, fig. 167)]. — Les nodules des stations 4 et 7, noirâtres et incrustés de glauconie, présentent des échancrures remplies par ce minéral.

Les grains de quartz et de glauconie l'emportent tour à tour mais eu égard au volume relatif des éléments, c'est la glauconie qui vient en première ligne. Suivant les échantillons, le quartz (*a*) forme des grains de diamètre variable et ne dépassant guère 0 millim. 13 ou des éléments de diamètre toujours inférieur à 0 millim. 10. La glauconie (*b*) affiche la plus grande irrégularité dans sa distribution, totalement absente ici, et, là, formant à elle seule la plus grande partie des rognons. Les *Globigérines* (*c*) sont très répandues, si bien que la place réservée au ciment (*d*) est des plus restreintes.

Entre ce type de nodule et le précédent les différences sont purement quantitatives; encore sont-elles atténuées par des variétés de transition.

3° *Nodules calcaréo-phosphatés à Bryozoaires et Pulvinulines* [n° 9, 240 br. (439 m.), S. de l'Agulhas Bank (Pl. II, fig. 168)]. — Nodules de couleur très foncée, dans lesquels le quartz, représenté par les grains, mesurant au plus 0 millim. 06-0 millim. 07, accentue sa régression. La glauconie est, en moyenne, peu répandue ou rare. De volumineux restes de *Bryozoaires* (*a*) très fragmentaires font leur apparition et comptent au moins une dizaine de représentants par coupe. Les *Globigérines* ont considérablement diminué, réduction incomplètement compensée par une multiplication très marquée des *Pulvinulines* (*b*) généralement caractérisées par un test très épais. Au surplus, la place réservée à la gangue a notablement augmenté (*c*). Il en résulte une physiologie fort différente de celle des types précédents.

4° *Nodules calcaréo-phosphatés quartzeux et pétris de Globigérines* [n° 3, 230 br. (421 m.), Vasco de Gama (Pl. LII, fig. 169)]. — Ces nodules diffèrent beaucoup des précédents par leur couleur jaune chamois. Les grains de quartz (*a*) se multiplient, sans jamais revêtir le même degré de fréquence que tous les nodules des deux premières catégories. Passablement variable, leur diamètre atteint au maximum 0 millim. 13, avec un minimum qui peut être inférieur à 0 millim. 05. La glauconie est reléguée au rang d'élément accessoire. Ce type de nodule tire sa principale caractéristique de l'abondance de *Globigérines* (*b*) et de la présence de quelques spicules d'*Eponges* (*c*) calcifiés. Quant à la gangue, elle joue un rôle très effacé.

La roche-mère des nodules, constituée de la sorte, est un dépôt de passage à la vase à *Globigérines* proprement dite.

5° *Nodules phosphatés et ferrugineux à Globigérines* [n° 5, 105 brasses (192 m.), Cap Saint-Blaize (Pl. LIII, fig. 170)]. — De forme anguleuse et de couleur brune, ces nodules sont à peu de chose près dépourvus de quartz (*b*) (0 millim. 05-0 millim. 10), très pauvres en glauconie et particulièrement riches en *Globigérines* (*c*). Leur ciment, à la fois phosphaté et ferrugineux (*d*), assure aux organismes une conservation exceptionnellement belle. Nombre d'entre eux sont criblés de perforations (*e*) remplies d'oxyde de fer. C'est de toute la série analysée le type de nodules offrant le plus d'affinités avec la vase à *Globigérines*.

6° *Nodules phosphatés et ferrugineux à grands Foraminifères benthiques et Bryozoaires* [n° 6, 105 br. (192 m.), Cap Saint-Blaize (Pl. LIII, fig. 172)]. — Bien que fournis par la même station que les précédents, ces nodules n'ont presque rien de commun avec eux (comparer les fig. 3 et 4). Les débris organiques, abondants au point de se toucher souvent, communiquent aux coupes minces un aspect grossier très prononcé. Ce sont, principalement, des restes de *Foraminifères* benthiques (*d*) à test extrêmement épais, accompagnés de formes pélagiques, en nombre très accessoire, et, notamment, de *Globigérines* en très minime proportion. Puis viennent des fragments de colonies de *Bryozoaires*, de débris d'*Echinodermes* (plaques et piquants), les uns et les autres assez fréquents, quelques fragments de test de *Mollusques* et de *Brachiopodes*, à l'exclusion absolue des minéraux détritiques et de la glauconie. Dans ce complexe, où tout est chaotique, les *Foraminifères* pélagiques peuvent être rassemblés en traînées. La plupart des organismes sont criblés de perforations soulignées par du phosphate de chaux et de l'oxyde de fer. Beaucoup se montrent incomplets, rongés qu'ils sont par la gangue. Le phosphate de chaux amorphe et le peroxyde de fer jouent un rôle très important, et dans la fossilisation des tests, et dans le remplissage des cavités.

Aux six manières d'être précédentes, s'en ajoute une autre, toute différente, constituée par des nodules de sables verts phosphatés dont je fixerai plus loin les caractères (Pl. LIII, fig. 171).

Par les exemples passés en revue, lesquels ne donnent peut-être qu'une idée incomplète des manières d'être réalisées, il est possible de juger de la variété de roches phosphatées représentées dans le gisement. Elles sont ces roches, d'un type franchement terrigène, tel que les *nodules calcaréo-phosphatés très quartzeux aux nodules phosphatés et ferrugineux à Globigérines*, qui se réclament des formations pélagiques. Entre les deux termes extrêmes s'échelonnent des types intermédiaires dont le caractère terrigène s'efface peu à peu. Quant à la variété caractérisée par des *Bryozoaires* et de nombreux *Foraminifères* de fond, elle paraît se tenir en marge du complexe. J'y vois, pour ma part, un représentant de ces nombreux dépôts à base d'organismes, engendrés en milieu terrigène, qui ne figurent jamais dans la classification des sédiments marins actuels.

Pour poser dans toute son envergure le problème à résoudre, il faut ajouter que ces matériaux phosphatés ont été dragués sur un fond de *sables verts* et que les échantillons qui réalisent le meilleur type de vase à *Globigérines* — tout en s'écartant du type normal par une très faible proportion de granules de quartz — ont été recueillis à la profondeur de 105 brasses (192 m.) seulement, c'est-à-dire bien en dehors du domaine actuel des vases à *Globigérines*.

A ma connaissance, nul gisement de phosphate de chaux de la série sédimentaire ancienne ne réunit une pareille variété de types et ne soulève un problème de cette importance.

ANALYSE DES ÉLÉMENTS CONSTITUANTS DES NODULES.

Le peu que nous savons maintenant de la constitution des nodules ne laisse guère soupçonner le grand intérêt qui s'y attache pour éclairer l'histoire des concrétions phosphatées de tout âge, et des sédiments anciens, en général. C'est pourquoi, je vais caractériser successivement tous les matériaux des nodules, puis insister sur des particularités de structure qui donnent du milieu générateur une image fort imprévue.

MINÉRAUX.

D'un bout à l'autre de la série analysée, le *quartz* présente de grandes variations de fréquence, puisque les grains peuvent l'emporter dans la première variété et manquer complètement dans la dernière. Ces variations n'entraînent que de faibles changements dans la taille des éléments sans en modifier la morphologie. Tous sont anguleux, avec un diamètre moyen qui se tient toujours au-dessous de 0 millim. 10, c'est-à-dire que presque tous les grains sont susceptibles de flotter dans une eau très faiblement agitée. La forme anguleuse des grains, déjà notée par J. Murray et A.-F. Renard, en est la conséquence. A notre point de vue, une particularité domine toutes les autres, en ce qui concerne ce minéral : *les variations de la taille et du degré de fréquence des grains de quartz sont indépendantes de la profondeur à laquelle les nodules ont été dragués.*

Quant aux «Silicates» signalés par J. Murray et A.-F. Renard, ils se rapportent, sans doute possible, à des éléments feldspathiques plutôt rares, y compris des feldspaths tricliniques.

Glaucanie. — A dire vrai les nombreux travaux consacrés à ce minéral, et à son histoire, sont loin d'avoir épuisé le sujet, ce que prouvent les données suivantes :

J. Murray et A.-F. Renard nous ont appris, dans leur description des phosphates de l'Agulhas Bank, que la glaucanie, douée d'une structure cryptocristalline, pareille à celle de la glaucanie ancienne, se présente en grains arrondis, indépendants des organismes, et comme produit de remplissage de nombreux *Foraminifères*, en quoi elle réalise des manières d'être extrêmement banales. Leur étude a été très utilement complétée par L.-W. Collet et G.-W. Lee⁽¹⁾, qui ont découvert dans ces mêmes phosphates la variété que j'ai qualifiée naguère de glaucanie pigmentaire⁽²⁾.

Tenant pour acquises leurs observations, j'éviterai, autant que possible, de répéter ce qu'ils nous ont enseigné en la matière.

⁽¹⁾ L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank avec une note sur la glaucanie qu'elles contiennent par G. W. L. LEE (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXV, 1904-1905, p. 885-893).

L. W. COLLET et G. W. LEE. — Recherches sur la glaucanie (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXVI, 1906, p. 266-267).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. Géol. Nord*, t. IV, 2, 1897, p. 165 et 175).

Une analyse de Gumbel⁽¹⁾ de la glauconie de l'Agulhas Bank a donné les résultats suivants :

SiO ₂	46,90 p. 100
Al ₂ O ₃	4,06 —
Fe ₂ O ₃	27,09 —
FeO.....	3,60 —
CaO.....	0,20 —
MgO.....	0,70 —
K ₂ O.....	6,16 —
Na ₂ O.....	1,28 —
H ₂ O.....	9,25 —
	99,24 p. 100

En multipliant les préparations dans les nodules de l'Agulhas Bank, j'ai pu recueillir de nouvelles données qui intéressent, les unes, la glauconie des sédiments dont l'âge sera discuté plus loin, et les autres, l'histoire de la glauconie en général.

A. En dépit de la fréquence des grains de glauconie, d'une part, et des Rhizopodes, d'autre part, il est impossible d'observer un seul élément glauconieux renfermant un *Foraminifère* en inclusion.

B. Les rapports de la glauconie avec les *Foraminifères* fournissent matière à d'intéressantes observations. Le minéral envahit généralement toutes les loges, mais il peut en respecter une ou deux, et il est également susceptible de s'y associer au phosphate de chaux. Les chambres, une fois occupées, ou bien, le complexe glauconieux qui en résulte est frappé d'arrêt de développement, stade correspondant à des coquilles de *Foraminifères* absolument intactes remplies de glauconie; ou bien, la glauconie continue à se former, et alors toute une série de cas se présentent :

- a. Par exception la matière injecte les pores, sans qu'il y ait trace d'épigénie;
- b. La glauconie se fixe dans l'épaisseur du test, n'importe où, sous forme de tout petits globules, libres ou coalescents, qui détruisent la microstructure de la coquille;
- c. Tout le test est épigénisé par une glauconie, plus foncée que celle des loges, qui en conserve admirablement la structure car chose curieuse, les pores ne sont pas envahis. Les *Globigérines*, fossilisées de la sorte, fournissent de belles sections tangentiellles, sous forme de réseaux à mailles très régulières, rappelant par leur netteté, les coupes de *Crinoïdes*, minéralisés par des composés ferrugineux.

A ces exemples de pseudomorphose des coquilles de *Foraminifères* par la glauconie — lesquels, il faut le dire, ne sont nullement, des raretés dans le milieu — je rattache des fragments de test de *Foraminifères*, réduits à de simples arcs isolés, groupés de manière que leur fragmentation est certainement antérieure à leur mise en place. Eux aussi sont épigénisés sans remplissage des pores, et ils le sont sans la moindre bavure de la glauconie sur la gangue. En de certaines plages, ces débris de coquilles, convertis en glauconie, sont fréquents.

⁽¹⁾ V. GUMBEL. — Ueber die Natur und Bildungsweise des Glaukonits (*Sitz. d. Math. phys. Clsa. d. k. Akad. Wiss. Munchen*, t. XXVI, 1896, p. 545).

C'est la première fois qu'il m'est donné d'observer une pareille aptitude des restes de *Foraminifères* à l'épigénie, par la glauconie, sans qu'il soit porté atteinte ni à leur individualité ni à leur microstructure;

d. Dans une variante de cette façon d'être, tout le test est épigénisé, et les pores envahis. Grâce à sa coloration plus foncée le contenant reste parfaitement différencié du contenu. Et comme dans le cas précédent, il est impossible d'observer le plus petit débordement sur la gangue, qui puisse faire supposer l'existence d'un passage entre les moules glauconieux et les grains indépendants des *Foraminifères*;

e. Dans une cinquième manière d'être, comportant, de même que les précédentes, une substitution de la glauconie au carbonate de chaux des coquilles de *Rhizopodes*, celles-ci paraissent réduites à des moules, sans trace de test. Mais en beaucoup de cas on discerne un mince liséré de teinte vert jaunâtre très pâle, qui s'isole, entre les nicols croisés, par des teintes plus vives que le reste. En réalité, il y a épigénie du test, et orientation de la glauconie de manière à le différencier plus ou moins en lumière blanche et entre les nicols croisés.

Cet exemple démontre qu'une discrimination peut être nécessaire dans les moules de *Foraminifères*, lesquels sont susceptibles de représenter, dans une mesure à fixer, des *Foraminifères*, test compris. L'absence de cette différenciation, seulement observée dans quelques moules de *Foraminifères* est, en effet, de nature à faire supposer l'existence d'éléments engendrés dans des chambres de *Foraminifères*, puis extraits de celles-ci par une sorte de décortication d'origine mécanique. Rien n'est moins certain, et il se peut que toute la question de l'interprétation des moules glauconieux de *Foraminifères* soit à reprendre.

C. Les *Foraminifères*, souvent répandus à profusion dans les nodules, ne sont pas les seuls organismes plus ou moins transformés en glauconie. En partant des *Foraminifères*, qui jouent de beaucoup le rôle principal dans la fixation du minéral par les organismes, il faut passer d'emblée aux groupes des *Brachiopodes*, des *Bryozoaires* et des *Mollusques*, pour ne pas se trouver en présence d'exception sans intérêt. Dans les *Bryozoaires*, la glauconie ne fait rien de plus que de participer au remplissage des loges, et encore la majorité des débris est-elle exempte de minéralisation. Des fragments de *Brachiopodes* sont envahis par la glauconie en globules irréguliers, libres, groupés ou soudés.

D. En dehors des grains et de la glauconie des organismes, il existe encore une glauconie jouant le rôle de ciment. De cette manière d'être je ne puis citer, pour l'instant, qu'un seul exemple, observé dans le nodule le plus quartzeux de toute la série. Il s'y trouve une petite plage pétrie de grains de quartz, accompagnés de feldspaths, tous agglutinés par une glauconie très pure, laquelle déborde sur le ciment calcaréo-phosphaté voisin, à la fois par des prolongements irréguliers et par de petits éléments isolés de toutes parts.

Si l'on tient compte de la glauconie, d'apparence altérée, le développement du minéral, jouant le rôle de gangue, atteint des proportions inconnues dans le domaine des roches anciennes. Les nodules de teinte brune et de forme généralement anguleuse possèdent un ciment brun de plusieurs nuances, réalisant une minéralisation, généralisée au point que les îlots, calcaires témoins ne représentent qu'une fraction extrêmement faible de la gangue.

E. Une autre particularité nous met en présence d'une glauconie en veinules de très faible extension, pareilles à celles que j'ai signalées dans des nodules d'âge albien ⁽¹⁾. On verra plus loin que, dans certaines conditions, le même facies de la glauconie peut revêtir une grande extension.

F. L'aspect profondément altéré de la glauconie de certains nodules n'est pas un des faits les moins intéressants à signaler. Tout bien pesé, l'altération, réelle ou apparente, réalise deux cas différents, paraissant relever de deux phénomènes distincts :

a. Au milieu d'une plage riche en grains de glauconie très pure, on observe, par exemple, un seul et unique grain bruni à la périphérie, ou plusieurs éléments chargés d'oxyde de fer sur une épaisseur variable, l'altération pouvant gagner le centre et ne laisser que d'insignifiants témoins reconnaissables. La décomposition peut s'étendre à toute, ou presque toute la glauconie en grains d'une plage, et libérer de l'oxyde de fer, qui reste en partie sur place et voile le ciment du voisinage. Le même phénomène se produit aux dépens de la glauconie incluse dans les organismes. Et ici, comme là, le fer oxydé peut envahir la gangue et la teinter dans un rayon très variable, preuve que la décomposition s'est opérée *in situ*;

b. L'exemple de la glauconie chargée de fer hydroxydé, jouant le rôle de ciment dans les nodules anguleux de teinte brune, se réclame probablement d'un autre phénomène. Pas une seule plage n'a échappé à ce qui paraît être, à première vue, une altération très bien caractérisée, et développée à des degrés fort divers. Telle partie, restée verdâtre, est partout voilée par un peu d'oxyde de fer, telle autre est déjà fortement brunie, mais la teinte reste nuancée de vert, sans que la structure cryptocristalline, si caractéristique du minéral, soit effacée. De proche en proche, la couleur vire au brun foncé. Tout se passe donc comme s'il y avait formation à une échelle sans pareille de la glauconie jouant le rôle de ciment, puis altération non moins généralisée du minéral, libérant de l'oxyde de fer. Le phénomène serait d'importance, puisque L.-W. Collet a signalé jusqu'à 21,09 et 23,70 p. 100 de Fe^2O^3 dans des nodules jaunes ⁽²⁾. C'est probablement là une image inexacte de l'enchaînement des circonstances aboutissant à l'état de chose en question.

Cette opinion est fondée sur l'existence dans la gangue glauconieuse, d'apparence décomposée, de grains de glauconie absolument intacts. Dans l'hypothèse d'une altération, il faut admettre que la glauconie de seconde génération s'est profondément décomposée, alors que celle de la première, correspondant aux grains, est demeurée indemne, et cela dans tous les exemples observés. Je suis plutôt tenté de conclure que la glauconie du second temps a pris son facies actuel dès le moment de sa formation. Autrement dit, et pour des raisons qui échappent, les réactions qui engendrent le minéral élimineraient un excès de peroxyde de fer, et la glauconie dite altérée ne serait qu'une glauconie pigmentée par de l'oxyde de fer, dès sa formation.

A la vérité, la question s'est posée à L.-W. Collet qui a écrit, en parlant des nodules jaunes de la station de Vasco de Gama : « Une idée qui vient naturellement à l'esprit est que cette couleur des nodules jaunes pourrait être due à de l'oxyde de fer provenant d'une décomposition de la glauconie, ou que les conditions n'étant pas satisfaites pour la formation de la glauconie, ou hydro-

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — *Op. cit.*, p. 181.

⁽²⁾ L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 869 et 870.

silicate de fer et de potasse, il se soit formé un hydrate ou un oxyde de fer⁽¹⁾. Étant donné qu'on retrouve une trame de glauconie typique derrière le voile de l'oxyde de fer, ce que démontre l'examen entre les nicols croisés, il me paraît plus logique d'admettre que les réactions ont donné naissance à de la glauconie surchargée de peroxyde de fer. Il n'est pas impossible que le problème intéresse également certaines glauconies des terrains anciens qui paraissent avoir subi une altération généralisée.

Quoi qu'il en soit, le développement à grande échelle de la glauconie, jouant le rôle de ciment, est un fait certain.

CONCLUSIONS.

Ainsi qu'on l'apprendra bientôt, les détails dans lesquels je viens d'entrer sont loin de faire connaître tous les faciès réalisés par ce minéral dans les nodules. En tout cas, les faits saillants enregistrés jusqu'à présent sont au nombre de trois :

A. Abstraction faite des matériaux analysés, la minéralisation des coquilles de *Foraminifères* par la glauconie est un phénomène très rare. A eux seuls, les quelques échantillons analysés en détail en fournissent des exemples, incomparablement plus nombreux que l'ensemble des formations sédimentaires, soumises à l'étude micrographique jusqu'à ce jour.

B. A la lumière de ce que nous enseignent les nodules examinés, rien ne fait supposer que les grains libres procèdent d'une glauconie, primitivement englobée dans les loges des *Foraminifères*. Des auteurs qui se sont occupés autrefois de l'origine de la glauconie, les uns admettent que tous les grains, quels qu'ils soient, ont pris naissance à l'intérieur de cavités organiques et, généralement, dans les chambres de *Foraminifères*. C'est notamment l'opinion d'Ehrenberg, de W.-J. Sollas, Bonney, J. Murray et A.-F. Renard, etc... D'autres, comme J. Bailey, A.-E. Reuss, V. Gümbel, etc., sont partisans d'une dualité de formation.

L'hypothèse, souvent faite, que les innombrables éléments, dont la morphologie n'évoque aucune parenté organique, résultent de l'accroissement irrégulier ou de la fusion des moules de *Foraminifères*, n'est nullement confirmée dans l'espèce, et cependant le milieu se prête à des observations particulièrement décisives à cet égard, en raison du grand nombre de nodules et de grains libres rencontrés côte à côte. Jamais on ne voit un moule passer à un grain irrégulier et, jamais on ne voit un grain irrégulier englober un *Foraminifère* avec des loges oblitérées par de la glauconie. Dans tous les cas, et sans une seule exception, les deux catégories de grains de glauconie en présence manifestent la plus grande indépendance; ma conviction absolue est que, *dans le milieu considéré, les moules glauconieux restent des moules glauconieux, et que les grains de taille et de forme quelconques n'en procèdent jamais*. Et combien d'exemples, pris en dehors de mon sujet, viennent à l'appui de cet enseignement pour lui donner une portée générale. J'ajoute que le développement de la glauconie épigénique du ciment et une manière d'être sur laquelle j'insisterai plus loin prouvent, une fois de plus, que la glauconie peut se former à grande échelle indépendamment des organismes.

(1) L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 874 et 876

C. Tout incomplète qu'elle est, la précédente étude met en évidence l'existence d'au moins deux générations de glauconie, l'une réunissant les grains libres et moules de *Foraminifères*, et l'autre, la glauconie épigénique de la gangue, ainsi que les rares veinules mentionnées.

ORGANISMES.

En commençant par les formes les plus élevées, il y a lieu de signaler la présence exceptionnelle d'éclats de tissu osseux, généralement absents.

Aux *Brachiopodes* se rapportent un petit nombre de fragments de test et de coquilles entières, dont la moyenne correspond tout au plus à un exemplaire par coupe mince. Les uns et les autres ont gardé leur structure intacte et les canaux en sont, ou non, remplis de phosphate de chaux.

Moins rares que les *Brachiopodes*, les *Bryozoaires*, représentés par des colonies très fragmentaires, vingtaine d'individus par préparation, proportion notable, eu égard à la taille des débris.

Le groupe des *Mollusques*, qui a fourni la plus forte contribution, après celle des *Foraminifères*, réalise sa plus grande fréquence dans les nodules anguleux de couleur brune. Il y compte, au plus, quelques dizaines de formes arquées, fragmentaires et généralement minces, à microstructure conservée.

On peut rapporter aux *Oursins* des plaques calcaires d'une seule orientation optique, dont la microstructure est presque complètement effacée, ainsi que rarissimes piquants. Tous sont réunis dans les nodules bruns, à raison d'une dizaine de plaques par coupe mince, au maximum.

Les très rares spicules d'*Eponges*, observés, sont calcifiés. Cet exemple, unique pour le moment, prouve que *la dissolution des spicules silicieux et le remplissage des vides par la calcite, ne sont pas nécessairement des phénomènes très tardif et postérieurs à l'émersion des sédiments.*

Réunis, les organismes précédents ne sont rien par rapport aux *Foraminifères*, lesquels prédominent et de beaucoup. Sauf dans les nodules bruns à *Bryozoaires*, avec grands *Foraminifères benthiques*, les *Globigérines* l'emportent dans l'ensemble, au point de former, presque à elles seules la totalité des *Rhizopodes*. D'une manière générale, les *Foraminifères* sont entiers et de conservation admirable. Exception faite pour les nodules bruns, riches en *Foraminifères* de fond, les coquilles entières et fragmentaires n'ont enregistré aucune action corrosive, aussi est-il impossible de concevoir la fragmentation des *Globigérines* autrement que par voie mécanique.

Les organismes perforants ont laissé des traces profondes dans les nodules bruns, sous la forme de nombreuses tubulures irrégulières remplies de phosphate de chaux, de glauconie ferrugineuse, ou d'oxyde de fer opaque, dont la presque totalité est probablement à rapporter aux *Eponges*. Hormis les spicules de *Spongiaires* et les restes d'*Oursins*, les différents groupes ont subi leur action.

CIMENT.

Au point de vue de la constitution de la gangue, les nodules forment des groupes très dissemblables : les nodules bruns, d'une part, et les nodules noirâtres, d'autre part.

A. Par leur gangue, ceux-ci rappellent immédiatement au microscope les craies phosphatées du Nord de la France. Peu développé en moyenne, en raison de la profusion des *Foraminifères*, le ciment est généralement calcaréo-phosphaté, par endroits, phosphaté et calcaire et, très exceptionnellement, constitué par du phosphate de chaux pur sur des espaces des plus restreints. En lumière blanche, le développement du phosphate de chaux se signale par une teinte jaunâtre très pâle, qui s'accroît d'autant plus que la teneur en phosphate augmente, et, finalement, réalise une couleur jaune pâle. Entre les nicols croisés, la règle est que le fond jaunâtre s'émaille d'une infinité de petits points, brillants et irisés, représentant autant de témoins de carbonate de chaux, qui l'emportent lorsque la phosphatisation est faible, pour disparaître complètement dans les plages exceptionnelles où tout est phosphate. En somme, il suffit d'analyser un nombre très limité de nodules pour observer tous les passages entre une gangue exclusivement calcaire et un ciment entièrement phosphaté. Il s'ensuit qu'en moyenne les nodules en question sont plutôt pauvres en acide phosphorique.

B. En réalité, les nodules brunâtres, qui diffèrent beaucoup des précédents, sont fort loin de constituer une variété toujours pareille à elle-même. Limitée à deux échantillons, mon étude révèle des différences profondes entre l'un et l'autre.

Celui qui se résout en une vase à *Globigérines* en partie phosphatisée, possède un ciment essentiellement glauconieux, plus ou moins hématisé (Pl. LIII fig. 170), englobant quelques plages de vase à *Globigérines*, exemptes de minéralisation, exceptionnellement converties en calcite largement cristallisée, et, d'autres, plutôt rares qui sont en voie de phosphatisation. Il est difficile de dire si la gangue, fortement imprégnée d'oxyde de fer, n'est pas, en même temps un peu phosphatée, le fond brun s'opposant au diagnostic du phosphate de chaux.

Le ciment des nodules brunâtres, riches en gros *Foraminifères benthiques*, fait au phosphate de chaux visible une place prépondérante. Tantôt, ce minéral englobe uniformément tous les matériaux, parfaitement conservés, dans un fond jaunâtre, indifférencié, pétri de minuscules témoins calcaires; tantôt, il s'associe à de la calcite, très largement cristallisée, et se borne à revêtir d'un mince liséré, jaune pur, tous les éléments qu'il agglutine. En l'espèce, les débris organiques sont corrodés, et ils le sont parfois au point d'être méconnaissables. A vrai dire, c'est plutôt la calcite qui joue le rôle de ciment.

La même préparation montre ces deux manières d'être, auxquelles s'en ajoute une troisième, caractérisée par une gangue ferrugineuse (Pl. LIII, fig. 172), pareille à celle de l'échantillon précédent, sans qu'on puisse dire, cette fois, que l'oxyde de fer est intimement associé à de la glauconie comme c'est probable. Cette gangue ferrugineuse peut également réserver une place à de la calcite, reléguée à l'état d'îlots irréguliers, de toutes tailles, au sein de plages ferrugineuses.

L'histoire de ces nodules se complique donc d'une transformation profonde des témoins de la boue première, qui ont échappé à la phosphatisation et à la minéralisation, ces témoins revêtant aujourd'hui un état cristallin comparable à celui des calcaires anciens très recristallisés. Il y a même dans le milieu de véritables *filonnets de calcite*, en petit nombre, il est vrai, comme il s'en trouve dans les marbres anciens, sans qu'on puisse invoquer, pour les expliquer, une intervention dynamique quelconque.

Manière d'être du Phosphate de Chaux. — De prime abord, le phosphate de chaux observé joue un double rôle :

A. Il remplit les chambres de *Foraminifères*, le réseau cellulaire des plaques d'*Echinodermes*, les loges de *Bryozoaires*, etc. En réalité, cette manière d'être se confond avec la suivante, car le phosphate de chaux des chambres de *Foraminifères* est lui-même pétri de vestiges calcaires, témoignant d'un phénomène d'épigénie. La vérité est donc, qu'en dépit des apparences, ledit phosphate de chaux ne s'est pas concentré dans des vides.

B. Il épigénise à grande échelle la gangue calcaire des vases à *Foraminifères* et il se substitue également, mais à une échelle réduite, au test des organismes en présence.

Il en résulte que, dans ses deux principales manières d'être, le phosphate de chaux est indubitablement un produit de substitution.

Le phosphate de chaux, développé aux dépens du ciment, est optiquement amorphe, et dépourvu de toute espèce de différenciation morphologique, c'est-à-dire qu'il rentre dans le groupe de la *colophonite*, ou plus exactement de la *fluocolophonite*. Telle est la règle pour tous les nodules passés en revue, jusqu'à présent. On verra plus loin, en étudiant des échantillons de type aberrant, qu'une variété cristalline peut intervenir également, mais à titre exceptionnel, semble-t-il.

Le phosphate de chaux en grains est extrêmement rare, quand il ne manque pas complètement. Il y a sans doute des exceptions au cas général, car J. Murray, analysant les matériaux dragués par le *Blake*, note au sujet d'une concrétion, recueillie dans l'Atlantique, à la station 317, par 31°57 de lat. S., qu'elle renferme des grains phosphatés « similaires aux grains trouvés dans les nodules phosphatés dragués au large du Cap de Bonne-Espérance, et ailleurs, par le *Challenger* » (1).

En définitive, les transformations subies par les roches-mères, converties en phosphates pauvres, sont beaucoup moins profondes que celles notées par J. Murray et A.-F. Renard dans les nodules de l'Océan Indien, où il y a, à la fois, substitution intégrale, destruction des caractères organiques, développement d'une structure zonaire et cristallisation de la matière phosphatée (2).

ANOMALIES DE COMPOSITION ET DE STRUCTURE DES NODULES.

Des nodules de teinte foncée, procédant de bases à *Globigérines* quartzieuses, se singularisent, soit par l'existence d'îlots, de traînées et d'incrustations de constitution très aberrante, soit par la juxtaposition de deux roches profondément dissemblables.

1° NODULES A ENCLAVES TRÈS GLAUCONIEUSES.

A. La glauconie donne naissance à des traînées à contours franchement définis, d'où sont exclus minéraux et organismes. Elle diffère des grains disséminés dans la roche par une teinte légèrement brunâtre, qui ne correspond nullement à une élimination de peroxyde de fer. Sous cet aspect, le minéral présente une physionomie qui lui appartient en propre.

(1) J. MURRAY. — Report on the Specimens of Bottom Deposits (Croisière du *Blake* dans l'Atlantique) [*Bull. Mus. Comp. Zool.*, vol. XII, 1885-86, p. 43].

(2) J. MURRAY and A. F. RENARD. — *Op. cit.*, pl. xx, fig. 3 et 4.

Cette même variété sert de ciment à de volumineux grains de glauconie de couleur normale, nettement différents de ceux qui font partie intégrante des nodules. Si bien qu'on peut observer des traînées admirablement individualisées, exclusivement formées de grains de glauconie d'une certaine nuance (*g*), plongés dans une gangue glauconieuse d'une tout autre nuance. Il y a là, en présence, deux générations de glauconie qui n'ont rien de commun, en tant qu'âge, avec celles dont il a été question dans l'étude des nodules de type normal, et qu'on peut d'ailleurs observer dans un nodule donné, en dehors des concentrations dont il vient d'être question.

B. Des enclaves sont riches en grains de glauconie ordinaire, au point qu'ils en forment la majeure partie, à eux seuls, et qu'ils se touchent souvent. Sauf d'insignifiantes exceptions, le minéral est d'une grande limpidité, alors qu'il peut être très voilé dans les plages voisines.

A quelques exceptions près, les enclaves de cette catégorie ne réservent aucune place aux *Foraminifères* et autres organismes. Leur ciment est essentiellement ou tout entier phosphaté et, par surcroît, il est cryptocristallin, c'est-à-dire qu'il se rapporte à la *staffélite*. En général, le phosphate se différencie en un liseré très limpide autour des grains de glauconie et de quartz. Cette même différenciation s'observe également, mais pas toujours, au pourtour des îlots et traînées.

Les rapports de ces enclaves avec la roche voisine sont illustrés par les deux exemples suivants :

Voici d'abord le cas d'une traînée de phosphate glauconieux, qu'on ne peut imaginer mieux individualisée. D'un côté, elle est limitée par une ligne courbe, traversant une grande plage sans déviation, et, tranchant comme à l'emporte-pièce, les grains de glauconie et les éléments phosphatés qu'elle rencontre. Du côté opposé, la limite est irrégulière, accidentée de protubérances et de creux, allure qui fait songer immédiatement à des phénomènes de corrosion. De plus, le long de cette ligne de séparation, le nodule est fortement imprégné de glauconie, comme il s'en trouve fréquemment sur les anciens fonds durs, ravinés et corrodés.

Mais les relations entre les deux parties en présence sont susceptibles d'être tout autres. La soudure des deux roches se fait alors suivant une ligne très irrégulière, dont il est souvent impossible de fixer les limites, tant elles se fondent l'une dans l'autre à leur jonction.

En multipliant les coupes minces, on arrive à relier ces sortes d'enclaves avec la surface. Elles représentent, ni plus ni moins, qu'un produit de remplissage de tout ou partie des vides des nodules caverneux ou scoriacés. Telle de ces traînées, qui peut être suivie dans tout son développement, part du fond d'une cavité en forme d'entonnoir et s'insinue jusqu'au cœur des nodules. Bref, traînées et îlots ne font qu'un, et représentent des sections longitudinales et transversales de vides envahis par des sables verts.

Les échantillons qui se prêtent à ce genre d'observation correspondent, je crois, aux concrétions « avec fentes remplies d'une substance verdâtre » qui paraît à L.-W. Collet « pouvoir être attribuée à de la glauconie » ⁽¹⁾.

Rien n'est plus évident que les matériaux en question nous mettent en présence d'une inter-pénétration de deux roches foncièrement distinctes, d'une part, une ancienne vase à *Globigérines*,

⁽¹⁾ L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 867.

non typique, et, d'autre part, un véritable *sable vert*, l'un et l'autre consolidés. Le même contraste existe entre la matière des nodules et leurs incrustations minérales, lesquelles ne diffèrent en rien des îlots et traînées.

Dans ces conditions, il est impossible d'échapper à la conclusion que *des nodules engendrés aux dépens de vases à Globigérines, non typiques, ont été extraits de leur milieu générateur et entraînés sur des fonds où se déposaient des sables verts*. De cette conclusion en découle une autre : *Tout se passe comme si lesdits nodules, au cours de leur remaniement, avaient été transportés d'un sédiment, beaucoup plus pélagique que terrigène, dans un sédiment franchement terrigène, et, pour tout dire, de profondeurs données à des profondeurs plus faibles*.

2° NODULE FORMÉ DE DEUX ROCHES DIFFÉRENTES.

(Pl. LIII, fig. 171 et 172).

La station 11 (Vasco de Gama) située à 25 kilomètres de la côte, a fourni une série de « concrétions », au nombre desquelles se trouvaient la plus grosse connue, ainsi que des cailloux roulés de quartzites et de schistes. Dans un des nodules qu'il a figurés, L.-W. Collet a nettement distingué deux parties que sépare une ligne noire de 0 millim. 5 d'épaisseur, l'une jaunâtre, caractérisée par de nombreux *Foraminifères*, et, l'autre, noirâtre, riche en grains de glauconie⁽¹⁾. Ce nodule, dont la plus grande dimension est d'une dizaine de centimètres, est formé de deux roches profondément différentes, accolées dans des conditions telles qu'il serait inexact de dire que l'une d'elles sert de ciment à l'autre.

Sur une surface polie on distingue une partie de couleur claire, jaunâtre, ombrée vers le haut, sur une largeur d'environ 1 centimètre, surmontée d'une partie de teinte très foncée, dans laquelle on distingue, à la loupe, une foule de petits grains noirs de nature glauconieuse.

A. La partie jaunâtre (Pl. LIII, fig. 172 b), que tout démontre être la partie inférieure de l'échantillon en place, et qui, d'après L.-W. Collet, serait « formée presque entièrement de coquilles de *Foraminifères* », doit avoir une composition variable. En effet, des sections, tirées du même échantillon, se signalent par l'existence d'une faible proportion de *Foraminifères*, et, chose intéressante, par une répartition irrégulière des éléments organiques, ce qui explique, sans nul doute, le désaccord entre nos observations, quant à la teneur en *Foraminifères*. Quoi qu'il en soit, la roche jaunâtre, telle que je l'ai vue, renferme surtout des débris de *Bryozoaires*, et, suivant les plages, des *Foraminifères*, rares ou relativement fréquents, avec une grande prédominance de *Globigérines*. Le groupe des *Echinodermes* a pour représentants plusieurs plaques et un ou deux piquants d'*Oursins*, ainsi qu'un seul et unique spicule d'*Holoturie*. A tout cela, il faut ajouter plusieurs débris indéterminables. En des plages d'étendue notable, tous les organismes ont leur place marquée par des vides.

Le fond de la roche, constitué dans chaque coupe mince par du calcaire renfermant des dizaines de granules de quartz, est plus ou moins envahi par du phosphate de chaux et de la glauconie.

⁽¹⁾ L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas-Bank (*Proc. Soc. Roy. Edimburgh*, vol. XXV, 1905 p. 869 et fig. 3.

Et, il est d'autant plus phosphaté qu'on se rapproche du contact des deux roches en présence. A proximité, et le long de la ligne de suture (*c*), tout est phosphate et glauconie.

Le phosphate de chaux, teinté en jaune de différentes nuances, est nettement cryptocristallin. Dans les plages qui ont subi un commencement de décalcification, il peut être franchement cristallisé en des sortes d'écaillés courtes, bordant des vides, ou ordonnées en zones très minces. Sauf, à faible distance de la ligne de contact (*e*) le carbonate de chaux abonde, même dans les parties les plus phosphatisées, sous forme d'une infinité de petits témoins rongés, susceptibles de l'emporter. Le phénomène d'épigénie est manifeste.

Et, partout, la glauconie accompagne le phosphate de chaux, à l'état de grains très clairsemés et surtout de pigment. Son altération partielle n'est pas étrangère à la coloration jaune du dépôt. Du fait qu'elle ne s'étend pas à la glauconie de la partie supérieure du nodule, laquelle est de formation plus récente, il en résulte que la décomposition du minerai date de longtemps, et qu'elle est d'origine sous-marine.

La zone foncée, qui marque la limite supérieure de la roche à *Bryozoaires* et à *Foraminifères*, est caractérisée, non seulement par la disparition complète du carbonate de chaux, mais par le développement de la glauconie pigmentaire à une échelle unique à ma connaissance. Le phosphate de chaux et la glauconie y sont des plus intimement associés. Cette dernière substance se concentre en plages, taches, traînées et trabécules au dessin capricieux. Des traits pleins, sortes de veinules qui s'anastomosent, se relient entre eux, et créent un réseau discontinu, qui n'a pas son pareil dans aucune roche connue. Et, de surcroît, la glauconie épigénise tous les organismes de la zone, tels que *Foraminifères*, *Echinodermes* et *Bryozoaires*, en affichant une fraîcheur parfaite en tous points. C'est là qu'on peut observer les plus beaux *Foraminifères* convertis en glauconie.

La ligne même de suture (*e*) se suit d'un bout à l'autre sans la moindre hésitation. Elle est soulignée tantôt par une concentration de glauconie pigmentaire, de densité décroissante ou non vers le bas, et, tantôt, par une concentration de phosphate de chaux que soulignent une coloration et une limpidité particulières. *Pas un seul élément du calcaire phosphatisé ne la franchit.* En outre, son dessin se signale par de nombreuses irrégularités qui en font une *ligne de ravinement* des mieux caractérisées.

B. Cette ligne dépassée, on se trouve brusquement en présence d'une tout autre roche, celle-ci, grossière, pétrie de glauconie, beaucoup plus quartzreuse, privée d'organismes invertébrés, et pourvue d'une gangue phosphatée. Le contraste est extrêmement frappant. Ici, nulle trace de glauconie pigmentaire ou épigénique. Le minéral constitue une foule de grains très purs, de type banal, très volumineux, mesurant en moyenne 1 millimètre de diamètre, susceptibles de l'emporter, à eux seuls, en bien des plages (Pl. LIII, fig. 171 *a*). Par tous ses caractères, cette glauconie est identique à celle des incrustations et des nodules précédemment décrits. Aux granules qui représentent le quartz dans la précédente roche s'ajoutent de volumineux grains (*b*), mesurant jusqu'à 0 millim. 6 et plus (Pl. II, fig. 0 et 0), de telle sorte que dans l'étendue d'une même préparation, le diamètre des éléments peut varier dans le rapport de 1 à 30, et même davantage, ce qui est tout à fait anormal, et trahit un milieu fort agité. En fait d'organismes, on ne peut citer qu'un ou deux débris de tissu osseux, d'extinction très onduleuse. Le ciment (*e*) composé de phosphate de chaux teinté en gris, jaune paille ou jaune foncé, est franchement isotrope, ou cryptocristallin, entre les nicols croisés, et presque toujours exempt de fines inclusions calcaires.

Cette roche réalise, à s'y méprendre, les caractères de certains rognons des sables verts à *D. mamillare* de l'Est du Bassin parisien.

Il n'est pas superflu de noter ici que cette constitution est l'image même des nodules exclusivement formés de sables verts phosphatisés que j'aurais pu décrire avec les six types analysés sommairement (p. 34).

L'échantillon en question a enregistré, d'admirable façon, une grande perturbation qui a affecté le fond de la mer, à un moment donné, sous la forme d'une surface de ravinement. Il met en contact deux roches foncièrement distinctes, dont l'une procède de sables verts et l'autre d'un calcaire à *Bryozoaires* et à *Foraminifères*, c'est-à-dire deux dépôts se réclamant de deux milieux générateurs différents. Entre parenthèses, le terme concrétion paraît impropre pour désigner une roche, arrachée à la jonction de deux formations distinctes, et façonnée en nodule, ou pour mieux dire en galet.

CORROSION DES NODULES. — L'intrusion de la glauconie des sables verts dans certains nodules, analysés plus haut, a été conditionnée par un véritable phénomène de corrosion, aboutissant à la genèse de matériaux scoriacés, lorsque le processus est développé à l'extrême. Les cavités, ainsi créées, sont aujourd'hui, ou vides, ou plus ou moins remplies de phosphate glauconieux.

Mes matériaux d'études sont trop peu nombreux et ma documentation trop restreinte pour élucider cette question de la corrosion des rognons. Des nodules ont échappé au phénomène sans que je sache dans quelle proportion; c'est le cas, pour ceux qui procèdent des sables verts. D'autres en ont été affectés sur leur surface entière, ce qui leur a valu l'aspect scoriacé mentionné. D'autres, enfin, n'ont été corrodés que d'un seul côté; par exemple, un nodule brunâtre, très anguleux, reposant sur le fond par une face plane, a été corrodé et finement perforé à sa partie supérieure seulement. Tout fait supposer que la corrosion s'est opérée sur les matériaux préalablement détachés de leur roche-mère, c'est-à-dire sur les nodules eux-mêmes, en quoi le phénomène n'a rien de commun avec le ravinement enregistré par un échantillon.

Il ne peut être révoqué en doute que toute la corrosion des nodules est tant soit peu antérieure à la pénétration des sables verts dans les vides créés par le phénomène. Mais il est non moins certain que l'attaque des matériaux s'est poursuivie après le changement de régime qui a fait apparaître les sables verts. Témoin le nodule formé de deux roches distinctes, dont la partie supérieure caractérisée par un ancien sable vert phosphaté est elle-même corrodée.

Pour le moment, ce phénomène de *corrosion sous-marine* semble bien mystérieux, quant aux conditions de milieu qui en ont favorisé le développement. Peut-être l'examen de nombreux échantillons permettrait-il de l'éclairer quelque peu, ne fût-ce qu'en nous fixant sur ce point important : une station donnée fournit-elle, à la fois des rognons corrodés et d'autres qui ont échappé à la corrosion ?

TERMINOLOGIE À EMPLOYER POUR DÉSIGNER LES MATÉRIAUX PHOSPHATÉS DE L'AGULHAS-BANK. — C'est à dessein que j'ai renoncé au terme concrétion pour les nommer, avant de pouvoir procéder à une discrimination en connaissance de cause. Dans son acception très générale, le terme *nodule* n'implique aucune origine donnée, tandis que celui de *concrétion* évoque immédiatement l'idée de concentration autour d'un ou plusieurs points, servant de centres d'attraction. Telle est l'idée qu'on se fait, souvent à tort d'ailleurs, de la formation des silex. Dans l'espèce, il n'y a de con-

crétions proprement dites que les nodules phosphatés des sables verts. Tous les autres matériaux se réclament uniquement d'un phénomène de substitution du phosphate de chaux au carbonate de chaux, phénomène qui n'obéit nullement aux mêmes règles que le précédent, et qui, au surplus, reste absolument étranger à leur morphologie.

Bref, tous les matériaux phosphatés de l'Agulhas Bank, sans exception, sont des nodules, et une fraction indéterminée de ces nodules appartient à la catégorie des concrétions.

INTERPRÉTATION DES FAITS ET CONCLUSIONS.

En décrivant les matériaux dragués au Sud du Cap de Bonne-Espérance qui ont fourni, presque à eux seuls, les éléments de leur étude des concrétions phosphatées en voie de formation, J. Murray et A.-F. Renard ont insisté sur le fait capital que les minéraux et organismes des nodules, d'une part, et des sédiments dans lesquels ils sont engagés, d'autre part, sont les mêmes, ce qui serait le cas pour les concrétions des sables verts et celles de la vase à *Globigérines*. Cela revient à dire que tous les phosphates actuels, et ceux de l'Afrique australe en particulier, ont pris naissance *in situ*. A ce sujet, il ne peut être question de mettre en doute que J. Murray et A.-F. Renard ont étudié des nodules reflétant dans la perfection les caractères des sables verts et de la vase à *Globigérines*, et formés en place.

L.-W. Collet s'est rangé à leur opinion en écrivant : « Les concrétions phosphatées sont en quelque sorte l'image du fond dans lequel on les trouve »⁽¹⁾. Il est des faits invoqués par L.-W. Collet dans sa description des concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank qui plaident en faveur de cette conclusion. Telle est cette observation que dans les concrétions « la quantité de coquilles de *Globigérines* augmente avec la profondeur de la mer »⁽²⁾.

C'est le moment d'observer que les concrétions, qui ont fourni des matériaux d'études à J. Murray et à A.-F. Renard, ne se confondent pas avec celles qui ont procuré au Gouvernement du Cap un grand nombre d'échantillons. Ceci dit, une conclusion contraire à la précédente me paraît étayée par des données très probantes, et, si je ne me trompe, il y a dans la très intéressante monographie des concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank de L.-W. Collet, des arguments sérieux pour l'imposer.

La station 12 (421 m.) de l'Agulhas Bank a fourni à L.-W. Collet des nodules riches en *Globigérines*, au point qu'ils en sont fréquemment formés en entier, et quelques nodules qui « se composent uniquement de grains de glauconie cimentés par le phosphate »⁽³⁾. De même la station 7 (146-238 m.)⁽⁴⁾ lui a procuré des nodules très ferrugineux de couleur brun jaune et des nodules tout différents « ressemblant extérieurement à de la ponce »⁽⁵⁾. Les premiers, d'après G.-W. Lee, sont dépourvus de minéraux détritiques et les seconds renferment du quartz abon-

(1) L. W. COLLET. — Les dépôts marins, 1908, p. 200

(2) L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. 1905, p. 879).

(3) L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 876.

(4) Cette station 7 ne correspond nullement à celle qui est indiquée au tableau de la page.

(5) L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 877.

dant, etc. Et G.-W. Lee de conclure, en bonne logique, qu'il « y a une différence essentielle entre ces deux espèces de concrétions »⁽¹⁾.

D'observations personnelles, que j'ai consignées plus haut, il résulte que les nodules brunâtres, tirés d'une seule et même station [5, 105 br. (192 m.)], sont de caractères très disparates (p. 826), l'un, réalisant un type de vase à *Globigérines* consolidée, et l'autre, procédant d'un sédiment pétri de gros *Foraminifères* benthiques, avec fragments de colonies de *Bryozoaires*. Ce sont là deux roches extrêmement différentes, qui n'ont pu être engendrées sur le même fond.

L'existence des nodules caverneux à *Globigérines*, pourvus d'inclusions dont ces *Foraminifères* sont exclus, ainsi que le nodule composé de la station 11, qui se résoud en deux roches distinctes, séparées par une surface de ravinement, plaident dans le même sens.

De cet ensemble de données on peut tirer les conclusions suivantes :

1° Tous les nodules, analysés au début de cette étude, et, sans nul doute possible, une partie de ceux examinés par L. W. Collet, ont été remaniés, à un moment donné de leur histoire. On verra plus loin comment concilier la présence de nodules formés sur place avec l'existence de rognons remis en mouvement.

2° A la notion de *remaniement sous-marin*, s'en ajoute une autre, également formulée pour la première fois, en ce qui concerne les fonds actuels, je veux parler d'une *érosion sous-marine*, idéalement caractérisée. Le nodule composé, que j'ai longuement analysé, fournit, en effet, la preuve que le fond de la mer a été raviné, et que cette action érosive coïncide avec un changement radical dans les conditions de milieu, ainsi que dans la nature des sédiments. *Ces phénomènes de ravinement ont agi sur le substratum calcaire, à la façon des ruptures d'équilibre de l'époque supracrétacée sur les vases crayeuses du Bassin de Paris : durcissement du fond, imprégnation par du phosphate et de la glauconie, etc., rien n'y manque.*

Reste à fixer la succession des événements susceptibles d'expliquer le gisement, problème que la précédente analyse paraît avoir singulièrement obscurci, et qui me mettra dans la nécessité de sortir du domaine des faits, à un moment donné.

A mon avis, ce problème est essentiellement dominé par le fait capital suivant : *Tous les matériaux remaniés dérivent de dépôts qui ont pris naissance à des profondeurs plus grandes que celles où ils ont été dragués.* Cette observation fondamentale conduit à penser que la région a été le théâtre d'importants changements bathymétriques. Sans justifier leur opinion, Sir John Murray et E. Philippi ont mis en avant l'idée d'une élévation de fond⁽²⁾. Si je ne me trompe, *tout démontre l'intervention d'un mouvement d'exhaussement de grande amplitude, lequel a relevé des fonds calcaires de types variés, allant jusqu'aux vases à Globigérines.* Cette rupture d'équilibre, qui doit se chiffrer par des centaines de mètres, a mis fin au dépôt des calcaires, inauguré la formation des sables verts, et provoqué des phénomènes d'érosion, d'arrachement, d'entraînement et de brassage des matériaux. La phosphatisation rentre dans ce complexe de phénomènes dont nous retrouverons l'équivalent dans un lointain passé, toujours en liaison étroite avec la manifestation de

⁽¹⁾ L. W. COLLET. — *Op. cit.*, p. 878.

⁽²⁾ Sir JOHN MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, p. 186.

grandes perturbations. Et c'est également de cette période que date le phénomène de corrosion qui a façonné une partie des nodules, dans les conditions indiquées plus haut.

Pour plus de précision, il faut ajouter que le phénomène est moins simple qu'il ne paraît, car il se complique à la fois d'une remise en mouvement de matériaux et de la reprise ou de la continuation de l'action corrosive après la rupture d'équilibre, ainsi qu'en témoigne le nodule de composition mixte.

Que cette rupture d'équilibre, avec toutes ses conséquences, puisse expliquer la *dualité d'origine* des roches phosphatées, rien n'est plus simple à concevoir. En même temps que des matériaux préexistants ont été épigénisés, il s'est formé de véritables concrétions aux dépens des sables verts en voie de dépôt. On a vu, en étudiant les phosphates anciens, que pareille association n'est pas unique dans la série sédimentaire.

Si, comme je le crois, cet enchaînement de circonstances est l'expression de la vérité, il ne faut pas se dissimuler que tout n'est pas clair dans la précédente explication. Un épisode de leur histoire, notamment, reste quelque peu mystérieux. Comment les nodules ou les débris calcaires, dont ils procèdent, ont-ils été rassemblés ? Question d'autant plus importante que des roches formées dans des conditions bathymétriques, certainement très différentes, se trouvent aujourd'hui réunies en un même point.

Sans prétendre donner à ce problème la réponse qu'il comporte, peut-être la solution en doit-elle être cherchée dans la direction suivante :

A l'Agulhas Bank font suite, vers le large, des pentes très fortes qui conduisent rapidement à des fonds de trois mille mètres et plus. En réalité, la totalité des concrétions draguées par le *Challenger* et la très grande majorité de celles qui ont été fournies à L.-W. Collet par le Gouvernement du Cap et de mes matériaux d'étude ont été recueillis non sur l'Agulhas Bank proprement dit, mais sur ses pentes externes ainsi que je l'ai souligné au début. Des neuf stations correspondant aux nodules qui m'ont été envoyés, une seule se trouve sur l'Agulhas Bank même. C'est d'elle que sont tirés les nodules brunâtres, correspondant, l'un à une vase à *Globigérines*, et l'autre, à une boue calcaire renfermant de nombreux *Foraminifères* benthiques et des *Bryozoaires*. Pour que la lumière se fasse tant soit peu, il suffit d'admettre que les différents types de calcaires, mis à contribution pour engendrer les nodules phosphatés, concrétions non comprises, affleurent en couches horizontales sur les pentes du plateau que recouvre actuellement un manteau de sables verts, probablement très mince. Quelle que soit la succession des dépôts, il est tout naturel que, lors de la rupture d'équilibre, des mélanges se soient produits sur le talus externe du banc. Il faut encore supposer que, la surface de celui-ci profondément affouillée pendant l'exhaussement, rend accessible à la drague différents horizons du complexe constituant l'Agulhas Bank.

Que l'on s'engage ou non dans cette voie, il est maintenant hors de discussion que les *nodules phosphatés de l'Agulhas Bank*, contrairement à l'opinion de J. Murray, A.-F. Renard et L.-W. Collet, *ne relèvent pas des phénomènes actuels*.

Mais peut-être qu'ainsi présentée, la conclusion est trop absolue. Elle vise, en tout cas, et sans réserve, les nodules qui ne résultent pas de la consolidation de sables verts. Encore convient-il d'ajouter qu'elle s'applique également au nodule formé de deux roches soudées, dont l'une dérive de sables verts phosphatisés. En définitive, on peut démontrer que les nodules engendrés

par des calcaires épigénisés ne sont pas d'origine moderne, mais la même démonstration est impossible pour les concrétions qui se résolvent exclusivement en sables verts consolidés. N'empêche que le remaniement du morceau détaché au contact de sables verts et de leur substractum calcaire fait tout naturellement supposer que des nodules, exclusivement produits aux dépens des sables verts, datent de la même époque que les autres. Si j'évite de donner à ma conclusion une forme trop absolue, c'est parce que j'envisage l'hypothèse d'une genèse de longue durée pour les nodules des sables verts.

Quant à fixer, en connaissance de cause, l'âge des matériaux phosphatés de l'Agulhas Bank, il y faut renoncer. A ce sujet, il est nécessaire de rappeler que les dragages n'ont pas fourni que des nodules phosphatés. L.-W. Collet nous apprend que les nodules de l'Agulhas Bank sont « accompagnés de nombreux restes d'animaux », « consistant en dents de poissons et de squales, os tympaniques de cétacés »⁽¹⁾. Nous savons également par lui que la drague a ramené de la profondeur de 421 mètres (station Vasco de Gama)⁽²⁾, en plus des concrétions, « un grand nombre de fossiles de Lamellibranches et de Brachiopodes, ainsi que des coquilles mortes » et des représentants vivants de nombreux groupes « qui témoignent d'une abondance de vie »⁽³⁾ dans cette région. Pour ce qui est des fossiles, L. W. Collet note qu'on y trouve « tous les modes de passage depuis la coquille morte, blanche, à celle complètement transformée en phosphate de couleur brillante brune »⁽⁴⁾. L'auteur signale également la présence du phosphate de chaux dans les coquilles mortes. Malheureusement, aucun des tests fossilisés ne peut être identifié.

Maintenant que le problème est posé sur une base nouvelle, les coquilles en question pourraient fournir matière à deux observations intéressantes : 1° Sont-elles corrodées, elles datent pour le moins de la période de perturbation qui a déterminé un changement radical dans la nature des sédiments. 2° Sont-elles dépourvues de trace de corrosion, de même dimension et de même épaisseur que les coquilles vivantes ou mortes et non fossilisées, l'hypothèse de remaniement doit être écartée, et on en peut tirer parti pour fixer l'âge du dépôt.

Sir John Murray et E. Philippi, qui ont fait paraître leur brève étude sur les phosphates de l'Agulhas Bank, trois ans après la publication du mémoire de L.-W. Collet, ont écrit : « Es scheint aber sicher zu sein, dass diese Fauna nicht älter als jungtertiär ist... »⁽⁵⁾, mais sans esquisser la moindre démonstration.

La présence d'une dent de *Carcharodon*, appartenant vraisemblablement au *C. Rondeltii*, encore vivant, ne tranche pas la question. Il me paraît utile d'ajouter que A. W. Rogers, Directeur du service géologique de l'Union Sud-Africaine, a reconnu dans les matériaux dragués par le Dr Gilchrist une coquille d'*Aturia*, partiellement incluse dans le phosphate, « Which, m'écrivit-il, reminded me of the « remaniés » fossils, in the Cambridge Greensand ». Cette observation vieillit-

(1) L. W. COLLET. — Les dépôts marin, 1908, p. 207.

(2) Station qui a fourni à la fois des nodules très riches en Globigérines et des nodules uniquement composés de grains de glauconie cimentés par du phosphate de chaux.

(3) L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXV, 1905, p. 875).

(4) *Ibid.*, *id.*, p. 876

(5) Sir John MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, p. 186.

rait singulièrement le dépôt, si l'hypothèse d'un remaniement pouvait être écarté avec certitude, car les formes d'*Aturia* les plus récentes connues, remontent au Miocène. Mais, du moment que les matériaux sont pour le moins en partie remaniés, toute conclusion ferme est interdite.

En tout état de cause sur l'âge des dépôts phosphatés de l'Agulhas Bank, il est hors de conteste que la phosphatisation en grand qui les a engendrés a fait ses débuts bien avant l'époque actuelle, après la perturbation qui a mis fin au dépôt des calcaires pour leur substituer des sables verts. La rupture d'équilibre est telle qu'il faut très probablement franchir toute la période pléistocène pour la situer dans le temps.

Le fait, observé par L.-W. Collet, que des coquilles mortes, appartenant à des formes encore vivantes, sont incrustées de phosphate de chaux, n'entraîne nullement la conclusion que la phosphatisation s'est prolongée jusqu'à une époque toute récente. A ce point de vue l'absence d'incrustations de phosphate sur les coquilles vivantes est plutôt de nature à faire supposer que le dépôt ne continue pas de nos jours.

Peut-être le problème de l'âge des nodules phosphatés pourra-t-il être abordé par une tout autre voie. La rupture d'équilibre enregistrée par les dépôts sous-marins, non loin des rivages, n'a-t-elle pas laissé des traces sur la terre ferme? Dans l'affirmative, on entrevoit la possibilité de le résoudre. Sur ce point, la parole est aux géologues qui ont une connaissance approfondie de la région du Cap de Bonne-Espérance.

De tout ce que nous avons appris, il résulte que le gisement sous-marin de l'Agulhas Bank constitue en quelque sorte le dernier terme de l'importante série de sédiments qui s'échelonnent presque d'un bout à l'autre des temps géologiques. Il en résulte encore que le gisement en question, qu'on s'empressait de faire intervenir, toutes les fois qu'il s'agissait d'expliquer la genèse des phosphates sédimentaires, est loin de nous faire saisir sur le vif la mise en œuvre de tous les facteurs qui interviennent dans leur formation. A la lumière de ce que l'on sait maintenant, rien d'essentiel ne le différencie des formations phosphatées anciennes.

Il n'est pas exagéré de dire que la précédente étude s'est révélée pleine d'imprévu et d'une fécondité insoupçonnée. Outre les notions de grandes ruptures d'équilibre, de ravinement et de remaniement sous-marins qui s'en dégagent clairement, elle a mis en évidence l'existence de multiples générations de glauconie, et des conditions de fossilisation instructives (spicules d'*Eponges* calcifiés, de nombreux *Foraminifères* à test glauconieux). De plus, elle nous a fait connaître des phénomènes, développés en milieu sous-marin, qui relèvent d'ordinaire du régime continental, telles sont la décomposition de la glauconie, la cristallisation parfois très large du carbonate de chaux échappé à la phosphatisation, la genèse de véritables filonnets de calcite, la décalcification observée dans le nodule composé et la corrosion de nombreux nodules. Sous le rapport génétique, cette analyse souligne l'extrême rareté ou l'absence de restes microscopiques de *Poissons*, organismes dont le rôle est tenu pour prépondérant dans la genèse des nodules phosphatés en général. Enfin, du point de vue chimique, il y a lieu de rappeler la présence du fluor qui crée un lien de parenté très étroit entre les phosphates de l'Agulhas Bank et ceux des périodes passées.

Grâce aux matériaux qui ont été mis à ma disposition, la présente description revêt le caractère d'une étude de géologie sous-marine, appliquée, non à une mer intérieure et de profondeur réduite comme la Manche, mais à des fonds sous-océaniques, ainsi qu'à des sédiments pélagiques et

terrignens. Par tous ses aspects, cette étude se relie de la façon la plus intime à la géologie des formations émergées.

Si l'on retranche de l'ensemble des nodules phosphatés, rapportés à l'époque actuelle, ceux de l'Agulhas Bank, que pour des raisons impérieuses, on est obligé de vieillir, avec la réserve faite plus haut pour les rognons qui dérivent uniquement des sables verts, il faut convenir que le domaine des phosphates d'origine moderne se resserre étroitement. C'est l'évidence même que jusqu'à présent les nodules de l'Agulhas Bank ont fourni, à eux seuls, presque toutes les données réunies en matière de phosphates attribués aux temps actuels. Une fois rejetés dans le passé, nos connaissances se réduisent aux nodules dragués par le *Blake* et par le *Challenger* en dehors de l'Agulhas Bank. Qu'on le veuille ou non, les conclusions formulées pour les nodules de l'Agulhas Bank sont de nature à inspirer des doutes quant à l'âge des autres.

Au surplus, les auteurs qui ont signalé l'existence de nodules phosphatés se sont montrés très sobres de renseignements en ce qui les concerne. Sur leur degré de fréquence, il est impossible de recueillir la moindre donnée. Sommes-nous en présence de simples curiosités pétrographiques ou de véritables accumulations de rognons, ce qui change la physionomie de la question, c'est en vain que j'ai essayé de le savoir. Dans la première hypothèse, qui répond probablement à la réalité, l'existence de quelques nodules ne peut éclairer en rien le problème de la genèse des phosphates sédimentaires. C'est comme si l'on devait étudier la question de l'origine des phosphates anciens à la lumière des nodules qu'on peut recueillir de loin en loin dans la craie blanche du Bassin de Paris.

Observons, en outre, que sur le gisement des nodules autres que ceux de l'Agulhas Bank, on ne sait presque rien. Et ce que l'on sait ne peut que faire planer un doute sur l'âge qui leur a été attribué. L'unique rognon, décrit par J. Murray, provenant des sondages du *Blake*⁽¹⁾, a été dragué sur un *fond dur*, c'est-à-dire dans des conditions de gisement aberrantes. Dès lors, la question suivante se pose pour ainsi dire d'elle-même : ce fond dur ne trahit-il pas une ancienne rupture d'équilibre avec toutes ses conséquences ? Qu'on puisse poser pareille question, cela suffit pour ne savoir quel parti tirer des nodules dragués par le *Blake*.

Contre toute attente, les formations actuelles ne projettent que de bien faibles lueurs sur le vaste problème de la genèse des phosphates sédimentaires. Et nous voici amenés à mettre tout notre espoir dans le passé pour trouver la solution cherchée.

⁽¹⁾ J. MURRAY. — Three Cruises of the *Blake*, vol. I, 1888, p. 276, fig. 189.

CHAPITRE VIII.

GÉNÉRALITÉS SUR LES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

Le dernier chapitre de l'étude d'ensemble des phosphates de chaux sédimentaires, exclusivement consacré à l'exposé de généralités, comprendra six divisions :

1. *Données essentielles sur les matériaux constitutants.*
2. *Données chimiques.*
3. *Données géologiques.*
4. *Origine des gisements de phosphate de chaux.*
5. *Conditions du milieu générateur.*
6. *Enseignements d'ordre général, tirés de l'étude des phosphates de chaux sédimentaires.*

1° DONNÉES ESSENTIELLES SUR LES MATÉRIAUX CONSTITUANTS.

La collection des nombreux échantillons qui ont servi à élaborer le présent travail nous les montre infiniment divers d'aspect. De cette diversité les phosphates sont redevables à trois facteurs, d'importance extrêmement inégale, lesquels interviennent en étroite association. Ce sont, au tout premier rang, la *constitution* des phosphates, puis l'*état d'agrégation* et la *coloration*.

Le premier va faire l'objet d'un résumé substantiel, qui me dispense d'en parler longuement dans ce préambule. Je me borne à rappeler que les phosphates diffèrent avant tout par leur gangue, et qu'ils sont, tour à tour, calcaires, argileux, argilo-calcaires (marneux), calcaréo-argileux, siliceux et, par exception, charbonneux, pyriteux, glauconieux, etc. Ils diffèrent encore par les minéraux clastiques ou secondaires, ajoutés aux matériaux phosphatés, tels que quartz, feldspaths, glauconie et pyrite. Au surplus, les représentants du phosphate de chaux lui-même, par leurs changements de faciès, concourent également à en modifier la physionomie. Enfin, ils empruntent aux organismes un élément de différenciation de première importance.

De son côté, l'état d'agrégation est une cause de variation pour les caractères physiques. Des phosphates extrêmement cohérents, on passe, par tous les degrés, aux phosphates meubles, résultant, soit d'un défaut de consolidation, soit d'une désagrégation provoquée par les agents météoriques.

Quoique mettant en cause, d'une façon générale, une très faible quantité de produits, le facteur coloration n'est pas dénué d'importance; il intervient par les matériaux phosphatés eux-mêmes, et par les minéraux et organismes qui leur font cortège. Les nodules et grains renferment des

inclusions minérales et organiques très variées, ainsi qu'un résidu d'origine microplanktonique, lequel joue très souvent un rôle capital dans leur pigmentation. Il y faut ajouter les hydrocarbures des phosphates des États du Levant sous mandat, principalement de Tunisie et d'Algérie et par exception, des hydroxydes de fer. Le sujet se prête à de longs développements qui n'ont pas leur place ici.

A. CONSTITUTION DES PHOSPHATES.

Dans le résumé qui va suivre, je passerai successivement en revue : *a.* les *matériaux détritiques non phosphatés*; *b.* les *produits non phosphatés d'origine secondaire*; *c.* les *matériaux phosphatés* (pour mémoire); *d.* les *produits hydrocarbonés*; *e.* les *matières charbonneuses et produits dérivés*; *f.* les *organismes*; *g.* les *coprolithes*; *h.* et la *gangue*.

a. MATÉRIAUX DÉTRITIQUES NON PHOSPHATÉS.

Le rôle que jouent les matériaux détritiques non phosphatés varie naturellement suivant la nature du milieu où s'accumule le phosphate de chaux. Tel dépôt leur assure une place prépondérante; tel autre paraît les exclure, car on n'en voit aucune trace dans les coupes minces. Cette dernière affirmation n'exprime la vérité qu'à la condition de laisser hors de cause les éléments phosphatés, lesquels, par un point de leur histoire, relèvent des produits clastiques.

Des minéraux détritiques observés, je retiendrai le *quartz*, les *feldspaths* et la *matière argileuse*. Les autres, comme la tourmaline, le zircon, etc., seulement visibles quand le quartz abonde, et pour le moins d'une extrême rareté, ne méritent pas de retenir l'attention.

Quartz. — Des phosphates sont quartzeux, au point de rentrer dans la catégorie des grès. Tel est le cas pour un phosphate carbonifère de la Montagne Noire et des phosphates en nodules de l'Infracrétacé du Bassin de Paris. D'autres en sont pauvres, et il arrive qu'on n'en puisse observer un seul grain dans les sections minces. De ce nombre sont beaucoup de craies phosphatées du Bassin de Paris et les phosphates dinantiens des Pyrénées. D'autres, enfin, en renferment une proportion qui se traduit par la présence d'une ou plusieurs dizaines d'éléments dans chaque préparation. Beaucoup de phosphates en grains du Nord de l'Afrique rentrent dans ce groupe.

Les matériaux quartzeux d'un phosphate donné n'appartiennent pas toujours à un seul et même type. Il arrive qu'ils réalisent plusieurs manières d'être trahissant la mise à contribution de plusieurs roches-mères.

La considération du quartz détritique fournit de précieux témoignages dans l'étude des ruptures d'équilibre qui se manifestent loin des rivages, en démontrant que ni son degré de fréquence, ni la taille de ses éléments, ne sont affectés par les perturbations qui troublent la sédimentation.

Feldspaths. — Les feldspaths clastiques, compagnons inséparables du quartz, ne sont visibles qu'autant que ce minéral est très répandu. Par exception, ils peuvent être abondants au point qu'il soit nécessaire de les mettre en évidence dans la désignation de la roche qui les renferme [Phosphate feldspathique du Caradocien de la région de Meifod (Pays de Galles)].

Matière argileuse. — Sa diffusion est grande dans les milieux phosphatés, ainsi que le font pressentir les analyses chimiques. D'une manière générale, elle est visible à l'œil nu ou au microscope dans les phosphates ordoviciens du Pays de Galles et dans une partie des phosphates en grains, d'âge secondaire et tertiaire, où elle a sa place réservée dans la gangue, dont elle constitue une fraction extrêmement variable, mais faible en moyenne. A de très rares exceptions près, cette matière est franchement cristalline et douée de propriétés optiques qui permettent de conclure à son identité de nature dans beaucoup de gisements passés en revue. Son diagnostic reste à faire.

Le phosphate de la partie supérieure des couches I et II du gisement de Kourigha au Maroc renferme une forte proportion d'argile, dont l'origine, d'abord attribuée à des phénomènes latéritiques, est sédimentaire, sans aucun doute (p. 708 et suiv.); Pierre Urbain, qui en a fait l'étude aux rayons X, la rapporte à la *sépiolite*, c'est-à-dire à une argile magnésienne. J'incline à croire que ce produit appartient en propre aux deux horizons indiqués et à un banc qui leur fait suite dans le gisement de Bou-Lanouar (p. 710). La vérité est qu'aucune tentative n'a été faite pour l'identifier en d'autres milieux.

b. PRODUITS NON PHOSPHATÉS D'ORIGINE SECONDAIRE.

J'en retiendrai quatre : la *glauconie*, l'*hématite brune*, la *pyrite* et la *silice* sous diverses formes.

Glauconie. — La glauconie des phosphates est tour à tour un minéral engendré sur place, et un élément remanié, ce qui est le cas pour la plupart de ses manières d'être. Sa diffusion est très grande dans les milieux phosphatés, et il en est réellement peu dont elle soit exclue. Rappelons brièvement les principales particularités qu'elle présente.

1° Sous forme de grains remaniés, on la rencontre déjà dans les phosphates du Cambrien de Suède; on la retrouve dans les phosphates dévoniens du Tennessee, puis dans les nodules liasiques, bajociens, calloviens, oxfordiens, portlandiens, aptiens, albiens, cénomaniens et turo-niens de France, et dans le Sénonien de Belgique où elle est rare.

Elle figure dans les phosphates jurassiques (Volgien), ainsi que dans les gisements infracrétacés et cénomaniens de Russie et de Pologne, dont elle constitue souvent un élément essentiel. Il arrive même que les grains y soient tellement fréquents qu'ils l'emportent sur tous les autres matériaux réunis. C'est le cas pour des rognons du Cénomaniens de Wissant (Pas-de-Calais), rentrant, comme les précédents, dans le groupe des *glauconites phosphatées*.

Le minéral se retrouve, à raison de quelques grains seulement par section, dans maints phosphates de Tunisie, d'Algérie et du Maroc; mais il en est, comme ceux du Djebel-Sif (couche inférieure), de Kef-Souétir, de Chaketma, du Kouéf et du Djebel-Onk, qui en fournissent quelques dizaines d'éléments par coupe mince.

Ses représentants pullulent dans les phosphates maëstrichtiens du Djebel-Berda (Tunisie), qui peuvent réaliser le type de glauconite franche. Ils sont nombreux également dans des phosphates de Boghari (Algérie) et, principalement, dans des phosphates nummulitiques de l'Atlas septentrional (Médinet). Ajoutons que son intervention est constante dans le gisement de l'Agulhas Bank, dont certains nodules en sont très riches. A maintes reprises, il a été démontré dans les pages précédentes que la genèse de ces innombrables éléments est antérieure à leur mise en

place. Quelques-uns de ses représentants, tendant vers l'unité d'orientation optique, sont munis de clivages comme les phyllites.

2° Lorsque la glauconie se développe en présence de Rhizopodes, tels que Foraminifères et Radiolaires, il est rare qu'elle se concentre dans leurs cavités. A titre d'unique exception, jé signale des Radiolaires du Volgien de Russie (I, p. 131), dont la coquille phosphatée est remplie de glauconie. Il y a là un motif de plus pour rejeter l'opinion qu'en général les grains de glauconie sont d'anciens moulages de Foraminifères, dont l'empreinte organique s'est effacée au cours de leur développement⁽¹⁾.

3° La glauconie en grains remaniés est accompagnée d'un petit nombre d'éléments développés *in situ*, appelés à jouer le rôle de ciment. Ceux de Chebaou, du Djebel-Sif, du Kouif, de Chaketma et de Boghari en fournissent des exemples très démonstratifs. Le plus souvent, seule la morphologie des éléments différencie les deux générations. Dans le cas des phosphates de Boghari, la coloration des deux types de grains est nettement distincte.

4° Dans un autre faciès qu'il suffit de mentionner, le minéral incruste des grains de quartz en nombre très restreint au total. Ce revêtement glauconieux est également à rapporter à une phase antérieure au dépôt des matériaux phosphatés.

5° La glauconie donne encore naissance à des veinules développées dans des fissures de nodules albiens du Bassin de Paris, et plus particulièrement dans l'assise à *interruptus*. Il s'agit, en toute certitude, de veinules épigéniques de filonnets de calcite, marquant la place de fentes de retrait, et non d'une concentration du minéral dans des vides.

6° On peut encore mentionner la présence de la *glauconie pigmentaire*, engendrée *in situ* (Albien du Bassin de Paris), et l'existence de la glauconie étroitement associée à des grains de phosphate (Cénomaniens de Pernes-en-Artois).

Dans les phosphates de la région de Boghari (couche I, p. 576-577), la glauconie est pour les grains de phosphate un élément de variation très important. Associée en toute proportion au phosphate et jouant le rôle, tantôt de pigment, tantôt d'élément essentiel, elle évoque l'idée d'une fusion intime et d'une formation simultanée des deux minéraux. Les rares exemples d'ordonnance des deux substances combinées sont illustrés par quelques éléments formés d'un globule très régulier de phosphate de chaux, entouré d'une large couronne de glauconie, parfaitement individualisée, ou par des grains de glauconie servant de noyaux à des éléments phosphatés. De l'association intime de la glauconie et du phosphate de chaux, il résulte, dans la presque totalité des cas, qu'ils ont pris naissance simultanément ou successivement. Lorsque leur genèse s'est effectuée en des temps différents, la glauconie a fait son apparition avant ou après le phosphate de chaux. Comme depuis longtemps, cette affinité des deux minéraux l'un pour l'autre, tient vraisemblablement à ce que la glauconie est phosphoreuse dans toutes ses façons d'être. En dépit de cette affinité, il s'en faut de beaucoup que les deux substances soient inséparables. La glauconie est avant tout un minéral réservé aux dépôts terrigènes et aux sédiments de transition aux forma-

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées (Calcaires et dolomies), 1935, p. 48.

tions pélagiques. Au contraire, le phosphate de chaux se réclame, en moyenne, beaucoup plus des anciennes vases pélagiques que des sédiments terrigènes.

7° Comme le phosphate de chaux, la glauconie épigénise, en tout ou partie des débris organiques siliceux ou calcaires, tels que spicules d'Éponges, Foraminifères, etc.

Autant les grains de phosphate sont riches en inclusions organiques, autant ceux de glauconie en sont pauvres. Pour tout dire, l'existence de pareilles inclusions est d'une extrême rareté. Au total, j'y ai observé un seul Foraminifère (Boghari). Quant aux Diatomées et Radiolaires, ils font invariablement défaut. Tout se passe comme si les grains de glauconie avaient pris naissance sur des fonds autres que ceux qui ont engendré les grains à Diatomées, et c'est la conclusion qui tend à s'imposer dans tous les cas. Les inclusions minérales sont limitées à des débris de calcite nettement rongés, en voie de résorption, généralement absents et à de la pyrite.

Au fond, la glauconie des phosphates contribue à éclairer, sur bien des points, son histoire aussi complexe que variée. Celle-ci met en évidence jusqu'à trois générations successives dans un même gisement (Infracrétacé); elle fournit de nombreux témoignages en faveur de la genèse du minéral par épigénie du carbonate de chaux; et elle nous enseigne encore que les échancrures des grains, dans lesquelles on avait vu l'empreinte laissée par des organismes sont la conséquence de phénomènes de retrait.

Plus d'une fois, au cours de l'étude de ce minéral, il a été reconnu que son association intime avec l'hydroxyde de fer ne doit pas toujours être interprétée comme la conséquence d'un phénomène d'altération, et que dans certains cas, il y faut voir le résultat d'une élimination de peroxyde de fer en excès, lors de l'élaboration du minéral. Ainsi s'expliquerait, notamment, l'existence d'une gangue glauconieuse, d'apparence décomposée, emprisonnant des grains verts d'une fraîcheur parfaite dans des nodules de l'Agulhas Bank (p. 830). L'altération de la glauconie est d'ailleurs loin d'être aussi facile qu'on a tendance à l'admettre; et sa résistance à la décomposition dans certains cas est de nature à faire supposer que nous en connaissons mal les facteurs. A cet égard, l'exemple de la glauconie exempte de toute trace d'altération, incluse dans les sables phosphatés, dérivant de la décalcification de la craie phosphatée turonienne du Cambrésis (I, p. 195) est fort énigmatique. L'existence de glauconie, chargée d'oxyde de fer élaboré par altération, n'en est pas moins certaine en de multiples cas. Une pareille origine ne saurait être mise en doute lorsque l'hydroxyde de fer a émigré des grains pour se concentrer dans leur voisinage.

Fer hydroxydé. — Dans la grande majorité des cas, le développement du fer hydroxydé, en proportion méritant une mention, est réservé aux phosphates glauconieux. En particulier, cette substance acquiert une certaine fréquence dans les phosphates du Djebel Berda (II, p. 445), de Boghari (II, p. 577) et de Médinet (Atlas septentrional, p. 755). La couche I de la région de Boghari possède maints grains de phosphate envahis par des matières ocreuses, sous forme de punctuations, de mouchetures, de taches très étendues et parfois à dose massive. De surcroît, elles peuvent s'y grouper en lignes concentriques, susceptibles de leur communiquer un aspect grossièrement oolithique. En fait, il s'agit d'une exception.

Ce n'est un élément de quelque importance et de grande diffusion que dans les phosphates argilo-ferrugineux, couronnant les couches I et II de Kourigha. En l'espèce, il ne peut être question de la faire dériver de la décomposition de la glauconie et de lui attribuer une origine

secondaire. C'est chose certaine que son existence est liée à celle de la matière argileuse avec laquelle il a été mis en place. Partout ailleurs, il fait figure de produit d'altération, jouant le rôle de pigment, et n'intervenant qu'en proportions trop restreintes pour qu'il soit utile d'en rappeler des modalités. Notons cependant qu'il peut prendre part à la fossilisation des Diatomées, au même titre que la pyrite, et qu'il en est d'admirablement conservées grâce à son intervention (couche V du Kouif).

L'existence de sphérules et de petits cubes hématisés fait supposer qu'un peu d'hydroxyde de fer dérive de la pyrite.

Pyrite. — Sa diffusion est relativement grande, principalement dans les phosphates en nodules, mais il est très rare qu'elle constitue un élément essentiel. C'est donc à titre d'exception que le sulfure de fer se développe à dose massive, comme dans l'assise à *D. mamillare* du Boulonnais (I, p. 147), où il incruste des matériaux divers, remplit des vides et paraît se substituer au phosphate de chaux à grande échelle.

L'existence de la matière carbonneuse dans les phosphates du Culm des Pyrénées entraîne celle de la pyrite, avec une assez grande fréquence pour qu'on en puisse faire une des caractéristiques minérales de ces dépôts (I, 96). On l'observe également en notable proportion dans les phosphates carbonneux de l'Ordovicien du Pays de Galles. Elle intervient dans les rognons portlandiens et les phosphates aptiens du Boulonnais, ainsi que dans les nodules du Greensand de Cambridge. Une place importante lui est assurée dans les cherts de la craie phosphatée de Saint-Symphorien (Belgique). Entre autres faciès, elle se développe à l'état de filonnets, de mouchetures, de menues perles et de petits cubes.

Sa participation à la constitution des grains est loin d'être fréquente. N'empêche qu'elle y peut figurer à haute dose et en modifier beaucoup le faciès. Dans la petite couche de Bordj R'dir, par exemple, le sulfure de fer est inclus dans certains grains, à l'état de poudre très fine, dont les éléments sont, tantôt espacés, et tantôt serrés au point de créer un milieu continu, masquant complètement la matière phosphatée. Elle se développe dans le même milieu, sous forme de granulations à contours irréguliers dont la distribution est sujette à variations. Il arrive que, très rapprochées, elles donnent naissance à une couronne superficielle plus ou moins épaisse, à un noyau central, ainsi qu'à une zone moyenne de puissance variable (II, p. 556). Dans un phosphate de M'Zaïta, quelques grains sont revêtus d'une couronne de pyrite massive (II, p. 538).

Le minéral est susceptible de concourir à la constitution de la gangue, que, par exception, il forme à lui seul, comme dans les phosphates du Valanginien de Viatka (I, p. 171).

Nous savons déjà que sa présence est connue dans la glauconie, où elle est plutôt rare. Enfin, elle intervient dans la fossilisation des débris organiques, tels que plaquettes d'*Echinodermes*, spicules d'*Eponges* et *Radiolaires* (Valanginien de Viatka, I, p. 171).

J'incline à croire, sans pouvoir le démontrer, qu'une grande partie au moins de cette substance est d'origine sous-marine, et qu'elle résulte de la réduction des sulfates, sous l'influence des matières organiques.

Silice. — L'histoire de nos grands gisements de phosphate est liée à une trop grande élaboration de silice pour qu'il n'en reste pas des traces dans leur constitution. A vrai dire, il s'en faut de beaucoup que les témoins de cette silice, sous une forme inorganique, répondent par leur

fréquence et leur importance à la masse de silice éliminée au cours de la phosphatisation des éléments. La silice secondaire des phosphates est extraite des spicules d'*Eponges* dans une mesure extrêmement limitée, puis des *Radiolaires* à une échelle incomparablement plus grande, et principalement des *Diatomées*, auxquelles il faut ajouter des *Silicoflagellés*, en proportion tout à fait indéterminée.

Les nodules du Culm des Pyrénées fournissent de bons exemples de *quartzification*, engendrant, soit des plages de grains moulés les uns sur les autres, soit des veinules traversant tous les éléments constitutants. En l'espèce, la masse considérable de silice remise en mouvement dérive des *Radiolaires*. Dans un seul exemple, fourni par des nodules de la Montagne Noire, du quartz s'est développé aux dépens de spicules d'*Éponges* (I, p. 74). Aux phosphates du «banc constant» de M'Zaïta (II, p. 540) se rapporte un très curieux type de quartzification de *Radiolaires*, caractérisé par la formation de grains d'une seule orientation optique, dont chacun correspond à une coquille tout entière.

Dès qu'on aborde l'étude des phosphates en grains à *Diatomées*, l'histoire de la silice se confond donc pour ainsi dire avec celle de la gangue et des accidents siliceux qui leur sont subordonnés. Ceux d'Égypte, de Tunisie, d'Algérie et du Maroc fournissent d'excellents exemples de silicification du ciment, qui seront passés en revue en décrivant la gangue des phosphates en grains.

Rappelons qu'une grande masse de silice secondaire, engendrée aux dépens des organismes siliceux des phosphates, a donné naissance par concentration à des silex de types très variés. De l'analyse de ceux-ci découlent des enseignements qui seront mis en valeur, en dégagant les conclusions générales de l'étude des phosphates de chaux sédimentaires.

MATÉRIAUX PHOSPHATÉS.

En bonne logique, leur analyse doit être différée pour en rappeler les caractères au moment d'en expliquer la formation (p. 919).

PRODUITS HYDROCARBURÉS.

Ils jouent un rôle important, en tant que pigment, dans la constitution de certains phosphates en grains de Palestine, et surtout dans ceux de la Tunisie centrale et leur prolongement dans le département de Constantine. Et lorsque rien n'en révèle l'existence à l'œil, il suffit de frotter, même très légèrement, n'importe quel phosphate nord-africain pour qu'il s'en dégage une odeur, dite bitumineuse, très accentuée. L'imprégnation hydrocarburée est donc un phénomène absolument général dans tout le domaine indiqué.

Lorsqu'elle se manifeste au maximum, la teinte du phosphate, qui est normalement gris clair ou gris jaunâtre, vire au gris brun, ou devient franchement brune, voire brun noirâtre, colorations qui s'accroissent lorsque la roche est imprégnée d'eau de carrière. Les pentes de Rebiba, Kalaat-es-Senam et Kalaa-Djerda, en Tunisie centrale, de Tocqueville, M'Zaïta et Bordj R'dir, dans la région du Hodna, au Sud-Ouest de Sétif, sont par excellence les points où l'on peut

étudier les phosphates les plus modifiés par l'inclusion d'hydrocarbures. Dans l'état présent des connaissances, leur concentration paraît exceptionnelle dans les phosphates de l'empire chérifien. A cette exception répondent des phosphates dont les grains et le ciment sont également très imprégnés, rencontrés au-dessous du niveau hydrostatique dans une petite cuvette du siège de Louis Gentil dans les Ganntour.

Pour peu que les chantiers d'exploitation des phosphates très imprégnés de Tunisie soient insuffisamment aérés, il y règne une odeur « bitumineuse » extrêmement prononcée, susceptible d'incommoder les visiteurs. La concentration des produits peut être telle que le bitume liquide remplit, par exception, des sortes de cavités géodiques, et qu'il se concentre au voisinage de failles (Kalaa-Djerda). L'emmagasinement des hydrocarbures sous pression, en des poches formant vase clos, a donné lieu à plusieurs dégagements instantanés, qualifiés de « coups de grisou » par les ouvriers et assez violents pour causer des accidents mortels (Rebiba). Le gisement de ces hydrocarbures peut n'être pas limité aux phosphates. A Kalaa-Djerda, par exemple, les marnes du mur sont susceptibles d'être tellement hydrocarburées que l'emploi de lampes spéciales est parfois nécessaire. Le toit de la formation est parfois lui-même chargé d'hydrocarbures (II, p. 406). Bref, il s'agit, au total, non d'une imprégnation à dose ultra-faible, comme il en existe dans une foule de roches, dégageant une odeur fétide lorsqu'on les morcelle, mais de quelque chose d'important, posant un problème d'une certaine envergure.

Dès que l'imprégnation est assez prononcée pour que les phosphates revêtent une physionomie aberrante, elle marque son empreinte sur la constitution des matériaux phosphatés, et elle le fait de bien des manières :

1° Les grains laissent transparaître une sorte de nébulosité dans toute leur épaisseur, et leur teinte devient café au lait de plusieurs nuances, changement qui ne masque nullement les inclusions organiques;

2° La distribution du pigment entraîne une différenciation des éléments en présence. Par exemple, il se concentre à la périphérie des grains, voire dans une zone médiane. Il en peut même résulter des grains à structure très grossièrement concentrique, se décomposant en quelques zones aux limites indécises, alternativement claires et foncées;

3° Lorsque le phénomène atteint son maximum d'intensité, la concentration, dans tout ou partie des matériaux phosphatés est accusée au point qu'ils sont convertis en globules absolument opaques, déroband à l'œil la totalité des inclusions organiques.

Étudiés avec de forts grossissements, les grains imprégnés réalisent de multiples faciès :

1° A peine teintés, les grains sont comme revêtus d'un voile immatériel qu'il est impossible de résoudre en granulations constituantes;

2° A dose massive, l'addition d'hydrocarbures crée l'impression d'un milieu continu réfléchissant la lumière avec une teinte brunâtre;

3° La matière revêt une autre manière d'être sous la forme de granulations irrégulières se détachant en noir, en lumière transmise, et avec une couleur brunâtre en lumière réfléchie;

4° Le produit hydrocarburé s'individualise en menus débris organiques et en micro-organismes de taille extrêmement réduite, parmi lesquels on reconnaît les *Radiolaires* que j'ai qualifiés d'embryonnaires, des *Silicoflagellés*, des bâtonnets, décrits comme microspicules sans savoir ce qu'ils sont en réalité, des *Radiolaires* de dimensions normales, des *Diatomées*, etc., et jamais des organismes primitivement calcaires. Des grains, en nombre, sont pétris de ces restes organiques. Il est donc certain que la matière en question fossilise une foule de débris organiques, en même temps qu'elle imprègne le phosphate de chaux.

De tout cela, il résulte que la fixation des hydrocarbures dans le phosphate met en cause plusieurs manières d'être des produits hydrocarburés : une *matière bitumineuse liquide*, un *composé solide* et un *hydrocarbure gazeux*. En l'état de nos connaissances ni les uns, ni les autres ne sont définis chimiquement.

Des organismes, qui gisent à l'état libre dans les phosphates, seuls des restes de Vertébrés, en petit nombre, ont fixé des hydrocarbures. La concentration de ceux-ci dans les vides du tissu osseux en souligne admirablement la microstructure.

Règle générale, mais non absolue, l'imprégnation est limitée aux grains et aux quelques fragments de tissu osseux mentionnés, à l'exclusion presque toujours complète de la gangue, même dans le cas où elle est phosphatée. Les exceptions ont été observées dans des minerais de Kalaa-Djerda (Pl. XX, fig. 61), de Kalaat-es-Senam et de Bordj R'dir, dont le ciment partiellement phosphaté a fixé un peu d'hydrocarbure. En de rares exemples, la gangue calcaire est elle-même chargée d'hydrocarbures. J. de Lapparent a décrit de curieux rhomboédres, observés dans le ciment des phosphates du Kouif, renfermant des inclusions d'hydrocarbures⁽¹⁾.

Lorsque les hydrocarbures se sont fixés dans le ciment, la notion d'une imprégnation en deux temps s'impose. Un très bel exemple de ce cas très particulier est fourni par le gisement de Kalaa-Djerda (Kef Souétir) [II, p. 413]. Les échantillons que j'en ai tirés renferment des grains phosphatés, dépourvus d'imprégnation discernable au microscope, inclus dans une gangue très hydrocarburée. Inversement des grains, fortement pigmentés, sont plongés dans un ciment exempt d'imprégnation. Il est clair que le premier temps est antérieur à la mise en place des matériaux et que l'autre, d'importance très réduite, est postérieur à la sédimentation, ou presque contemporain de celle-ci (II, p. 413).

Le cas des phosphates imprégnés de la descenderie Dekakra du siège Louis Gentil dans les Ganntour est très spécial, en ce sens que la fixation des hydrocarbures intéresse à la fois les grains et toute la gangue. N'empêche que la proportion d'hydrocarbures emmagasinés est fort loin d'atteindre celle des gisements de Tunisie et d'Algérie ci-dessus désignés. En l'espèce, il s'agit d'une imprégnation contemporaine, ou peu s'en faut, de la sédimentation.

Dans une préparation donnée, voire dans une seule et même plage, des phosphates hydrocarburés de Tunisie, d'Algérie et de Palestine, il est possible d'observer côte à côte des grains imprégnés à des degrés fort divers et, par exemple, un élément rendu opaque par l'imprégnation, voisin d'un autre qui a gardé sa teinte normale. Cette particularité et le fait que la gangue ne fixe

⁽¹⁾ JACQUES DE LAPPARENT. — Mode d'imprégnation par les hydrocarbures de phosphates algériens (*B. S. G. Fr.*, 4^e S., t. XXV, 1925, p. 351-364, pl. X.

presque jamais d'hydrocarbures tendent à prouver, une fois de plus, que les matériaux imprégnés l'ont été avant leur dépôt. Quant aux différences si marquées dans l'état d'imprégnation des grains d'une même couche, elles résultent, si je ne me trompe, de ce que la fixation des hydrocarbures s'est effectuée en des milieux différents, ou en des points différents d'un même milieu.

Une autre donnée, digne d'être mise en valeur, est fournie par des grains fragmentaires, entourés comme beaucoup d'autres d'une couronne brun noirâtre. Du fait que celle-ci est ininterrompue par les plans de fracture et que ces matériaux sont associés à une gangue non hydrocarbonnée, il résulte que l'imprégnation est postérieure au morcellement des matériaux phosphatés et antérieure à la sédimentation phosphatée.

Que l'imprégnation soit presque toujours antérieure au remaniement, cela signifie qu'elle a pris naissance dans le milieu même où se trouve accumulée une grande provision de matière organique, en raison de l'existence d'innombrables Diatomées.

Le fait que, dans un bassin tel que celui de Redeyef-Aïn Moulès (Tunisie), une couche (I) est très chargée d'hydrocarbures dans le flanc sud (sables de Redeyef), alors que sur le versant opposé (gisement d'Aïn-Moularès), elle ne présente rien de particulier (II, p. 485), ne doit pas être interprété en faveur de l'imprégnation des grains au cours même de la sédimentation. A mon sens, il signifie que, suivant les points, le milieu générateur des grains a réalisé des conditions favorables ou non à la fixation des hydrocarbures, et que le remaniement des matériaux, pour constituer la couche en question, a rassemblé des éléments plus ou moins imprégnés sur le flanc méridional, et uniquement des grains non hydrocarbonnés sur le flanc opposé. Cet état de choses gagnera beaucoup en clarté, lorsque les synclinaux nous apparaîtront sous leur véritable jour.

Dégénérescence de l'imprégnation hydrocarbonnée avec le temps. — Ainsi qu'en témoignent les deux observations suivantes, l'imprégnation des grains phosphatés, et accessoirement des gangues, est loin de nous renseigner avec exactitude, sur ce qu'elle fut à l'origine : 1° d'une manière générale, dans un gisement donné, la coloration des matériaux s'atténue beaucoup au voisinage de la surface et aux affleurements, phénomène synonyme d'appauvrissement en hydrocarbonnés; 2° des silex, subordonnés à des phosphates très imprégnés, renferment des grains beaucoup plus teintés que ceux des phosphates, du fait que la matière même des silex s'est opposée à la migration des hydrocarbures inclus (Kalaat-es-Senam). Bref, *tels qu'on les voit aujourd'hui, les phosphates de la Tunisie et de l'Est algérien sont dépouillés d'une partie des hydrocarbures qui s'y trouvaient emmagasinés dès le principe.*

L'exemple des phosphates uniformément imprégnés, rencontrés dans la descenderie de Dekakra du centre Louis Gentil des Gantour, où la conservation en grand des hydrocarbures s'observe au-dessous du niveau hydrostatique, me paraît plaider dans le même sens.

Origine des hydrocarbures. — Le domaine des solutions possibles, en ce qui concerne l'origine de ces imprégnations est étroitement circonscrit par les rapports des phosphates imprégnés avec les terrains encaissants. Les faits sont tels qu'il est nécessaire de trouver une solution qui ne mette pas en cause une source profonde. Jamais, en effet, l'exploitation, pourtant intensive, des phosphates n'a relevé la moindre trace d'une voie d'accès, de nature à faire supposer que les hydrocarbures ont une origine étrangère aux formations phosphatées qui les renferment. Observons que la concentration des hydrocarbures est localisée le long d'une grande traînée de phosphates,

orientée suivant les parallèles, se réclamant de conditions de milieu spéciales d'un bout à l'autre. Par tous ses caractères, cette bande trahit une exceptionnelle instabilité des fonds. Les agents mécaniques, et, notamment, les courants, y ont laissé d'importants témoignages de leur intervention et de leur puissance, sous la forme de conglomérats grossiers, dont les matériaux ont été empruntés à la formation phosphatée même.

Rien n'est plus évident que cette bande a réalisé, sur le fond de la mer, des conditions favorables à l'élaboration et à la conservation des hydrocarbures, en dehors de toute influence étrangère. A la lumière de ce que nous avons appris, touchant le rôle du microplankton dans la constitution des grains de phosphate, il est hors de conteste que ceux-ci ont été engendrés dans un milieu qu'on ne saurait imaginer plus riche en matière organique. De surcroît, c'est un fait bien établi que les hydrocarbures font leur apparition dans les phosphates de l'Afrique du Nord, en même temps que les *Diatomées*, accompagnées ou non de *Radiolaires* en proportions très variables. Cela étant, l'origine des hydrocarbures est toute trouvée, si l'on admet que la décomposition de cette matière s'est opérée dans des conditions favorables à la fixation des hydrocarbures mis en liberté.

Mais cette condition de milieu, qui est nécessaire, n'est pas suffisante pour assurer la conservation des hydrocarbures. Si l'on en juge par le degré de fréquence des carapaces de *Diatomées* dans les grains de phosphate de Gafsa, nulle part la mer génératrice des phosphates suessoniens n'a réalisé des conditions aussi favorables à la production d'hydrocarbures en grande masse. Et pourtant les grains n'en ont emmagasiné que des traces dans le Bassin de Metlaoué. Cette quasi absence d'hydrocarbures n'est nulle part plus remarquable que dans l'immense Bassin de Kourigha (Maroc), dont les phosphates sont composés des grains se réclamant d'une grande pureté et d'une teneur en hydrocarbures imperceptible à l'œil. Ces phosphates de Kourigha procèdent, eux aussi, d'une ancienne vase à *Diatomées*, laquelle, il est vrai, ne paraît pas avoir réalisé une richesse en valves, comparable à celle des phosphates tunisiens.

Si l'on se demande en quoi la bande algéro-tunisienne, caractérisée par des phosphates hydrocarbonés a différé de celle de Gafsa, au point de vue des conditions de milieu, c'est, de toute évidence, par une sédimentation beaucoup plus troublée et plus grossière, se traduisant, comme nous le savons déjà, par une plus grande activité dynamique et la genèse de conglomérats. Cette différence s'accroît beaucoup dès qu'il s'agit des phosphates de Kourigha, accumulés sur des fonds incomparablement moins affectés par les agents dynamiques. Il en résulte que, selon toutes probabilités, les grains phosphatés avec leurs hydrocarbures ont été ensevelis beaucoup plus vite en Tunisie centrale et dans le Bassin du Hodna que dans ceux de Gafsa et de Kourigha, circonstance à laquelle ils sont redevables de leur richesse en hydrocarbures. Ce qui revient à dire que *toutes choses égales d'ailleurs, la teneur en hydrocarbures des grains est fonction de leur vitesse d'enfouissement.*

L'imprégnation hydrocarbonée des grains de phosphate et le problème de l'origine des pétroles. — Par un enchaînement des plus logiques, l'étude des phosphates nord-africains nous met en présence du problème de l'origine et de l'emmagasinement des hydrocarbures liquides. A supposer que la formation phosphatée de l'Afrique du Nord ait été immédiatement enfouie sous une couverture imperméable, de manière à garder la totalité de ses hydrocarbures élaborés sur place, puis entraînée en profondeur par des mouvements orogéniques, il en serait résulté un véritable gise-

ment d'hydrocarbures. Il va de soi que dans un pareil gisement, *d'origine nettement marine et non lagunaire, la roche-mère et la roche-magasin se confondraient en une seule*. Reste à savoir, du point de vue pratique, si ces conditions n'ont pas été réalisées quelque part dans le Nord africain. A cet égard, il est opportun de rappeler que des phosphates permien du Wyoming (États-Unis), également imprégnés d'hydrocarbures, contiennent suffisamment d'huile minérale pour qu'on en puisse extraire du pétrole avec succès (I, p. 86).

Entre ce problème et celui des pétroles, tel qu'on le pose de préférence, il y a une différence fondamentale, en dépit de leur étroite parenté. D'une part, les phosphates en question, tout en perdant la presque totalité de leurs hydrocarbures, ont conservé, en nombre illimité, les micro-organismes qui ont concouru à leur formation. D'autre part, le plankton, mis à contribution dans la théorie organique de l'origine des pétroles, reste inconnu; et tout se passe comme s'il n'avait laissé d'autres témoins que le produit qui en est dérivé. Notre ignorance, sous ce rapport, tient peut-être à ce que tout l'effort des chercheurs porte sur les roches-magasins, à l'exclusion des roches-mères. Elle tient peut-être également à ce que, sans raison décisive, la théorie organique de l'origine des pétroles est manifestement seule à bénéficier de la faveur des géologues. A mon sens, l'éclectisme en la matière, bien que démodé, n'en est pas moins rationnel.

Quoi qu'il en soit, l'étude de l'imprégnation hydrocarbonnée des phosphates de l'Afrique du Nord, engendrés en milieu franchement marin, me paraît ouvrir un nouvel horizon dans le domaine si vaste et si complexe de l'origine des hydrocarbures liquides, dans les formations sédimentaires.

e. MATIÈRES CHARBONNEUSES ET PRODUITS DÉRIVÉS.

Au nombre des particularités qui caractérisent les phosphates paléozoïques d'Europe, il convient de noter que presque tous sont riches en carbone d'origine organique (I, p. 100). Toujours parfaitement individualisée, cette substance, qui me paraît se confondre avec celle des schistes ampéliteux, se détache en noir avec un reflet de même couleur. Des essais préliminaires le séparent de la matière des combustibles et du graphite. Mon hypothèse, qu'elle ne diffère peut-être du graphite que par son état amorphe, requiert une vérification. Aucune trace de micro-structure ne peut être invoquée pour en démontrer l'origine végétale, laquelle se réclame d'un caractère de grande probabilité pour les phosphates carbonifères. Mais il est hors de doute que dans le cas des phosphates dinantiens des Pyrénées et de la Montagne-Noire, la matière, après transformation, a dû revêtir un état colloïdal et se déplacer à la manière d'un fluide (I, p. 95). Qu'il en fût ainsi, la preuve est fournie par les nombreux Radiolaires qu'elle fossilise, par la différenciation globulaire qu'elle réalise dans la perfection (I, Pl. III, fig. 9, 10; Pl. IV, fig. 11), ainsi que par son association intime avec le phosphate de chaux. En vérité, tout fait supposer que le carbone en question est d'origine organique (I, p. 102).

Je crois devoir souligner, une fois encore, la grande diffusion du carbone d'origine organique dans les dépôts paléozoïques, où j'en ai observé la présence dès l'Ordovicien (Pays de Galles, I, p. 31), et sa disparition, une fois les temps primaires révolus. « Cette fréquence des dépôts ampéliteux dans la série paléozoïque, ai-je noté, et leur disparition à l'époque secondaire, me paraissent prouver à l'évidence que nos mers paléozoïques répondent à des conditions de milieu

très spéciales, et que d'autres conditions ont prévalu à partir de la période mésozoïque » (I, p. 103). A eux seuls, les phosphates carbonifères des Pyrénées, riches en Radiolaires de haute mer, admirablement caractérisés comme tels, et très chargés de matière charbonneuse, fournissent en faveur de cet enseignement un argument qu'il est difficile d'imaginer plus probant.

f. ORGANISMES.

Si l'on envisage l'ensemble des gisements passés en revue, il est vrai de dire que la contribution des organismes à la formation des phosphates est à la fois abondante et sujette à de grandes variations. Mais la formule cesse d'être une image fidèle de la vérité, dès que l'on considère les gisements les uns après les autres. En ligne générale, *la contribution organique est d'autant plus importante et moins diverse que les phosphates sont plus riches*. A titre d'exemple, citons le cas des phosphates de Gafsa, dont les grains sont pétris de *Diatomées*, accompagnées de quelques Radiolaires, constituant une flore et une faune aussi peu diversifiée que possible. A l'opposé, il existe des phosphates pauvres, comme ceux de l'Ordovicien du Pays de Galles, du Jurassique du Bassin de Paris, etc., qui renferment des débris organiques très variés, mais moins nombreux. A cette règle, échappe un phosphate d'Esthonie, d'origine très aberrante, presque entièrement composé de débris de *Brachiopodes* inarticulés, engendrant par leur accumulation un produit, qui, sans être riche, peut être mis en valeur. N'empêche que la règle formulée s'applique à la quasi totalité des phosphates analysés.

Si l'on serre de plus près la question, on constate que *ce sont les phosphates d'origine pélagique qui fournissent les titres les plus élevés, marchant de pair avec une exceptionnelle richesse en microorganismes, se rapportant à un nombre très limité de types. Le contraire s'observe pour les phosphates subordonnés aux dépôts terrigènes, lesquels accusent une moindre teneur en acide phosphorique, en même temps qu'une moindre fréquence en organismes, celle-ci compensée par une certaine diversité dans les individus*.

Les règles précédentes ne sont pas les seules qui se dégagent de la considération des organismes. Il suffit, en effet, de fixer la part qui revient à chaque groupe, dans la constitution des phosphates, pour réunir les éléments d'une autre loi, celle-ci intéressant au premier chef la genèse des matériaux phosphatés. A cet égard, ce serait travestir le rôle des matériaux organiques dans la constitution des phosphates que de le considérer du seul point de vue numérique. On sait qu'il y a des organismes qui apportent avec eux une provision de phosphate et d'autres qui n'en renferment que des traces. Mais ce qui importe davantage, sous le rapport génétique, c'est qu'il y a des organismes qui paraissent jouer un rôle capital dans la concentration du phosphate de chaux pour engendrer des grains, et d'autres qui ne participent pour ainsi dire jamais à leur élaboration. Le rôle des uns et des autres va ressortir clairement du groupement des nombreuses données éparses dans les descriptions des gisements.

CONTRIBUTION VÉGÉTALE.

Contre toute attente, elle est prépondérante au total, raison pour laquelle elle figure ici en toute première ligne.

DIATOMÉES MARINES. — La contribution végétale est redevable de sa grande prédominance à des organismes monocellulaires relevant du groupe des *Diatomées*. A ma connaissance, leur présence se manifeste pour la première fois en milieu phosphaté dans l'Albien du Gouvernement de Simbirsk en Russie (I, p. 170); puis on les retrouve en très grande abondance dans le Céno-manien de Polpino (région de Briansk), où elles caractérisent une *diatomite phosphatée* à Radiolaires (I, p. 187). Avec le Sénonien, on les voit reparaitre, jouant au total, un rôle très effacé dans les phosphates de Sebaïa (Égypte, II, p. 361), où elles font partie de fragments de diatomites. Nulle trace n'en a été observée dans les gisements de craie phosphatée de France, de Belgique et d'ailleurs.

Dès qu'apparaissent les phosphates de Tunisie, d'Algérie et du Maroc, qu'ils soient supra-crétacés ou tertiaires, les Diatomées viennent de beaucoup au premier rang des inclusions organiques. A la vérité, un rôle immense leur est dévolu. *Toutes, sans en excepter une seule, appartiennent en propre aux grains.* On peut se reporter à l'image agrandie d'une coupe de grain de Gafsa (Pl. XXIII, fig. 70) pour juger de l'extrême fréquence de leurs carapaces, entières ou réduites en miettes. Ajoutons qu'elles ont été retrouvées dans les roches phosphatées de l'Atlas de Marrakech et du Sénégal. En particulier, le même degré de richesse que dans les phosphates de Gafsa est réalisé dans un phosphate nummulitique de Kik, dans l'Atlas septentrional (p. 756). Pour juger du rôle considérable joué par ces organismes, il faut tenir compte de la destruction qui s'en est faite, à très grande échelle, dans certains phosphates, comme ceux des Ganntour, des Bassins de Chichaoua, des Meskala et des gisements de l'Atlas de Marrakech, où les carapaces qui n'ont pas été totalement éliminées sont représentées par un fouillis de très menus débris, correspondant aux fine-washings des vases à Diatomées actuelles.

Avec ou sans le concours des Radiolaires, les Diatomées fournissent la caractéristique fondamentale d'une vaste province pétrographique, s'étendant des bords de l'Atlantique, à la Tunisie comprise. Jusqu'à plus ample informé, cette formidable accumulation de Diatomées marines est unique dans la série sédimentaire ancienne.

Il est de règle que la silice des valves ait été éliminée, pour être remplacée par du phosphate dans la presque totalité des cas. Les exceptions comprennent des carapaces épigénisées par des composés hydrocarbonés, voire par des composés ferrugineux, et jamais glauconieux. Par exception, des valves ont été quartzifiées (II, p. 540). En vain, chercherait-on dans la série des phosphates sédimentaires connus un second dépôt qui ait été le siège de phénomènes d'épigénie développés à pareille échelle.

ALGUES CALCAIRES. — Les seuls représentants authentiques de ce groupe se rapportent aux Coccolithophoridées et aux Mélobésiées.

Coccolithophoridées. — La présence des Coccolithophoridées n'est démontrée que dans les phosphates glauconieux de Médinet dont certaines plages sont bourrées de *Coccolithes*.

En d'autres phosphates, tels que les nodules à *D. mamillare*, et surtout ceux des argiles à *H. interruptus* du Boulonnais, des corpuscules abondamment représentés appartiennent probablement au même groupe.

Mélobésiées. — Ces algues n'ont été rencontrées qu'en très petit nombre dans un seul et même échantillon, provenant de la région subatlantique méridionale (plateau d'Agued n'Mougar) [p. 758].

Algues indéterminées. — Je crois pouvoir rapporter à ce groupe des restes organiques observés avec une certaine fréquence dans les phosphates permien des Montagnes Rocheuses (phosphates de Montpellier [Idaho] I, p. 90). A ma connaissance, ce sont des curiosités, plutôt que des organismes constituants d'importance.

La présence en a été reconnue, notamment, en tant qu'Algues filamenteuses, dans la couche inférieure de Rebiba (II, p. 396), et d'une manière générale, de loin en loin, dans les phosphates à Diatomées, où elles sont toujours extrêmement rares. Dans presque tous les cas, leur diagnostic réclame une confirmation.

Bactériacées (Pl. LIV fig. 173-176). — A ce groupe je rapporte une foule de corpuscules, très microscopiques, visibles dans certaines conditions, qui paraissent avoir joué un rôle de grande ampleur dans la fixation de l'acide phosphorique de l'eau de mer. J'en donnerai les caractéristiques, au moment de leur assigner une place dans la conception de la formation des phosphates sédimentaires, que je me propose d'exposer plus loin. Pour le moment, je me borne à en signaler la diffusion dans les phosphates sédimentaires de tout âge.

Débris végétaux. — Les phosphates carbonifères des Pyrénées et ceux de la Montagne Noire renferment des restes de plantes fossiles *Lepidostrobus*, signalés depuis longtemps. Il en existe également dans l'Albien du Bassin de Paris, où l'on peut observer les débris gisant au milieu des nodules phosphatés. En particulier, des rognons extraits des sables verts du Boulonnais contiennent des fragments de tissu végétal, fossilisés par du phosphate de chaux et, pour ce motif, d'une conservation admirable (I, p. 149). A elle seule, cette particularité suffit pour démontrer que les fragments en question ont dû être minéralisés sans délai.

Carbone des phosphates paléozoïques. — Son existence est à signaler à cette place, en raison de l'explication que j'ai proposée touchant son origine. Tout un enchaînement d'observations et de déductions m'a conduit à voir dans la grande accumulation de carbone des gisements de phosphate d'âge paléozoïque la conséquence d'une importante contribution d'algues. De l'intervention de ces organismes en grande masse résulteraient à la fois du phosphate et le carbone en présence. Cette conception emprunte une certaine force au fait que « les mers primaires ont été, avant tout, les mers à Algues », que ces organismes sont susceptibles de fournir à la fois du phosphate et la matière carbonneuse et, qu'en l'espèce, rien ne fait supposer que celle-ci puisse se réclamer d'une autre origine (I, p. 100-103). On peut ajouter qu'en général, mais non de façon absolue, les dépôts de carbone ne se réclament pas de l'activité animale.

CONTRIBUTION ANIMALE

Elle est fournie, à la fois par des organismes monocellulaires qui, à eux tous, exercent une action très importante, mais non prépondérante, dans la genèse des phosphates sédimentaires, soit simplement par leur présence et leur développement numérique, soit en jouant un rôle pour ainsi dire actif, et par des organismes d'un ordre plus élevé, comprenant des restes d'Invertébrés et de Vertébrés, qui interviennent à des titres divers.

Silicoflagellés et organismes indéterminés. — Des *Silicoflagellés* je ne puis signaler la présence que dans la province des phosphates à Diatomées. Leur étude n'est malheureusement qu'à peine ébauchée. La diffusion de ces organismes paraît atteindre son maximum dans le Bassin de Gafsa, et surtout dans les gisements de M'Dilla et du Djebel Onk, où des hydrocarbures se sont fixés en notable proportion sur les microorganismes (II, Pl. XXIX, fig. 89 et 90). C'est grâce à cette circonstance qu'ils sont très bien individualisés dans les coupes minces, où il est possible de les étudier dans les mêmes conditions que les autres microorganismes, et non par transparence comme dans les silex.

En leur compagnie ou non, on observe souvent avec une grande fréquence de minuscules bâtonnets, toujours simples, qu'il ne peut être question de rattacher aux Spongiaires. Observés pour la première fois dans les phosphates des États du Levant sous mandat, ils revêtent leur maximum de fréquence dans les Bassins de Gafsa et du Djebel-Onk. Et on les retrouve parfois nombreux dans les phosphates du Hodna et dans ceux du Maroc. Des grains en sont pétris (II, Pl. XXII, fig. 68 et Pl. XXVII, fig. 83). Ce sont invariablement des bâtonnets indifférenciés et presque toujours cylindriques. Deux exemples sont de nature à faire supposer que certains d'entre eux, tout au moins, étaient originellement groupés en rayons autour d'un centre non fossilisé (II, Pl. XXII, fig. 68).

La même indécision plane sur des formes globuleuses, de taille non moins réduite, parfois vides, généralement remplies d'hydrocarbures solides. L'attribution que j'en ai faite aux Radiolaires, en les qualifiant de Radiolaires embryonnaires, ou frappés d'arrêt de développement, est fondée sur l'existence d'individus sphériques à coquille simple ou double et treillisée, ornée ou non de piquants, et leur association à des formes en cloches de taille également très réduite réalisant les caractères de Radiolaires. Il se peut que les autres, beaucoup plus nombreuses relèvent pour le moins en partie du groupe des Silicoflagellés. Quoi qu'il en soit, avec les microspicules dont il a été question plus haut, ces organismes globuleux sont susceptibles de jouer un rôle important dans la constitution du microplankton des grains de phosphate.

Radiolaires. — C'est avec les Diatomées le groupe qui a le plus largement bénéficié de l'étude des phosphates sédimentaires, en ce sens qu'elle a mis en évidence une diffusion de ces organismes absolument insoupçonnée. Dans l'espèce, ce sont des microorganismes susceptibles de figurer dans les milieux les plus divers et de présenter une très large distribution dans le temps et dans l'espace.

Leur intervention dans la constitution des phosphates date du Dinantien. C'est alors qu'ils engendrent les radiolarites typiques phosphatisées des Pyrénées, de la Montagne Noire et de la Pologne.

Pour les retrouver en nombre, il faut arriver à l'étage volgien et surtout au Valanginien de Russie, lequel dans la région de Viatka fournit une radiolarite phosphatée de type exceptionnel, très glauconieuse, un peu quartzeuse, renfermant des spicules d'Eponges. Des phosphates à Radiolaires existent également dans l'Albien de Russie. Ainsi que je l'ai fait ressortir, le trait dominant des phosphates infracrétacés de Russie est de constituer des roches qui s'échelonnent des grès à Radiolaires à des radiolarites de type aberrant (I, p. 172). Au Cénomaniens, les Radiolaires acquièrent quelque fréquence dans une diatomite de la région de Briansk.

Les craies phosphatées sénoniennes de France, de Belgique et d'Angleterre n'en fournissent

que de rarissimes individus. Mais sur les bords de la Méditerranée orientale, on les observe en qualité d'éléments des plus accessoires, et seulement dans quelques phosphates de Syrie et de Transjordanie.

Tous les phosphates à Diatomées de la France nord-africaine réservent pour le moins une petite place aux Radiolaires. Ceux-ci se multiplient au Sud du Bassin de Gafsa, et plus particulièrement dans le gisement de M'Dilla, où ils réalisent leur maximum de fréquence, en tant que Radiolaires libres. Les phosphates du Djebel-Onk et de Bordj R'dir leur réservent également une place très appréciable. Des phosphates à Radiolaires existent dans le gisement de Médinet (Atlas septentrional), où ils sont nombreux en voie de destruction (p. 754). Quelques individus ont été reconnus également dans les phosphates à Diatomées de Kik (p. 757).

D'une façon générale, l'état de conservation de nombreux individus, qu'on observe à tous les stades de destruction jusqu'à disparition complète, impose la conclusion que le degré de fréquence actuel des Radiolaires peut être très inférieur à ce qu'il fut à l'origine. De tous les phosphates étudiés, ceux de M'Dilla réalisent les conditions les plus favorables à cette démonstration.

Rapport des Radiolaires avec les matériaux phosphatés. — Les Radiolaires en question figurent dans les phosphates analysés en liaison ou non avec les éléments phosphatés :

1° L'existence de Radiolaires libres dans la gangue est purement accidentelle et des plus rares en moyenne. Reconnue dans les phosphates de Syrie pour quelques individus seulement, elle a été constatée dans ceux de M'Dilla. Tous, à ce qu'il semble, ont concentré du phosphate dans leurs cavités;

2° Il est de règle que dans les phosphates en grains, les Radiolaires soient inclus dans les éléments, à raison d'un seul par unité. Les faits sont tels qu'il est certain que ces grains n'ont jamais été détachés de radiolarites préexistantes, car les Radiolaires y sont toujours centrés, sauf dans le cas de friction et d'érosion d'éléments, dont l'usure a progressé inégalement sur toute la surface. Bref, les Radiolaires jouent le rôle de noyaux dans lesdits grains, à l'exemple des Foraminifères dans nos craies phosphatées. Cette particularité n'est pas dénuée d'intérêt pour expliquer la formation des grains. En l'espèce, chaque élément englobe un Radiolaire rempli de phosphate de chaux et comporte une enveloppe également phosphatée d'épaisseur variable. Le cas des Radiolaires répandus à profusion dans les phosphates valanginiens de Viatka (Russie) est spécial, en ce sens que la couronne est des plus rudimentaires, si bien que les grains se résolvent, à peu de chose près, en coquilles de Radiolaires dont les cavités sont oblitérées par du phosphate de chaux.

3° Dans une troisième et dernière manière d'être, les Radiolaires sont inclus dans des complexes, réalisant plusieurs faciès distincts :

A. Les uns correspondent à des grains plus volumineux que les autres, bourrés de restes de microplankton, comprenant des Radiolaires plus petits que les précédents, accompagnés de Diatomées, parfois de Silicoflagellés et de très menus débris organiques indéchiffrables. Les phosphates du Djebel-Onk et du Hodna en renferment de très beaux exemplaires (P. XXIX, fig. 89 et 90 et Pl. XXX, fig. 91).

B. A la deuxième catégorie se rapportent de volumineux nodules-concrétions, tels que ceux du Culm des Pyrénées, qui procèdent d'une vase à Radiolaires pélagiques phosphatisée.

C. Moins répandus que les premiers, les autres, classés comme radiolarites, typiques ou non, se résolvent en débris fragmentaires, extraits de roches préexistantes, et remaniés. Tel est le cas pour les matériaux à Radiolaires du gisement de Safâga (Égypte), du Djebel-Sif (Tunisie) et pour une partie de ceux du Hodna (Algérie). Dans certains phosphates de cette dernière région, il existe de volumineux éléments remaniés, très clairsemés ou rares, par exception empruntés à des radiolarites typiques (p. 540), et le plus souvent à des roches moyennement riches en Radiolaires, contenant ou non des Diatomées. L'un des fragments, tiré d'un minerai du Djebel-Sif (Kalaa-Djerda, Tunisie), est le seul qui ait conservé d'importants terrains des fine-washings.

Par exception, des phosphates de la voie ferrée de Kourigha (p. 682) renferment des fragments remaniés réunissant en proportions sensiblement égales des Radiolaires et des Diatomées.

Enseignements tirés de l'étude des Radiolaires des phosphates. — Ils se ramènent à six principaux :

1° Des Radiolaires observés participent à la formation de roches très variées, d'origine terrigène et surtout pélagique, en association ou non avec des Diatomées, et par exception avec des restes de Spongiaires.

2° Non seulement le groupe des *Spumellaria* l'emporte de beaucoup sur celui de *Nassellaria*, mais dans la grande majorité des gisements visités, le premier existe à l'exclusion du second. Le cas des phosphates carbonifères des Pyrénées et de la Montagne Noire est des plus remarquables à cet égard. À de rares exceptions près toujours presque négligeables, les phosphates à Diatomées du Nord de l'Afrique donnent lieu à la même observation. Au nombre de ces exceptions, on peut citer un phosphate de M'Zaita, contenant de gros éléments, montrant côte à côte des *Diatomées*, des *Sphaeroïdea* et des *Cyrtoïdea*. Les phosphates du *Valanginien* de Viatka (Russie) échappent également à cette règle. Toutefois, il est à noter que les *Nassellaria* y sont en minorité. Dans les deux gisements de l'Atlas, qui ont fourni des phosphates à Radiolaires (Médinet et Kik), quelques formes en cloches ont été observées.

L'élimination du groupe des *Nassellaria* de la plupart des faunes observées est quelque peu mystérieuse. Notons à ce sujet que J. Murray et E. Philippi ont figuré une vase à Radiolaires, draguée par 4.448 mètres de profondeur dans la région subantarctique de l'Atlantique, au N.-E. de l'île Bouvet, dont la faune est essentiellement composée de formes globuleuses relevant des *Spumellaria*⁽¹⁾.

Le précédent enseignement sur la nature des faunes à Radiolaires des phosphates est tiré de la considération exclusive des individus de taille normale. Si l'on fait entrer en ligne de compte les organismes que j'ai qualifiés de Radiolaires embryonnaires, l'association des *Spumellaria* et des *Cyrtoïdea* revêt une moindre rareté. Le fait saillant de la très grande prépondérance des Radiolaires globuleux n'en garde pas moins toute sa valeur.

3° En moyenne, les formes de surface viennent au tout premier rang. On les observe à l'exclusion complète des autres dans les phosphates dinantiens des Pyrénées, caractérisés par la fréquence d'appendices très déliés, parfois très longs et, pour ainsi dire, toujours intacts. Les types

(1) J. MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — *Op. cit.*, pl. XVIII. Cette planche représente uniquement des Radiolaires globuleux à rattacher à ce groupe.

de fond sont loin d'être exclus. Il s'en trouve dans les phosphates carbonifères de la Montagne Noire, Valanginien de Russie, Suessoniens de Tunisie (Kalaa-Djerda) et du Hodna. A cet habitat correspondent des coquilles robustes, généralement privées d'appendices, ou simplement pourvues de courts piquants.

Exception faite pour les fragments de radiolarites mentionnés plus haut, les Radiolaires des phosphates à Diatomées sont caractérisés par des coquilles d'une extrême finesse, creusées de pores très larges et le plus souvent d'ouvertures très grandes, si bien que la quantité de matière à laquelle elles correspondent est des plus minimales et que les coquilles sont très fragiles. L'explication de la genèse des grains de phosphate qui les englobent doit tenir compte de cette circonstance, d'autant plus que les nombreux individus observés ne sont jamais fragmentaires, et privés de leurs appendices, même lorsqu'ils sont longs et grêles.

4° Si la notion de *Radiolaires* embryonnaires ou de *Radiolaires* frappés d'arrêt de développement, formulée nombre de fois dans le cours de cette étude, est à retenir définitivement la contribution de ces organismes à la genèse des phosphates est beaucoup plus importante que les précédents développements ne le font supposer. Notons qu'à ma connaissance, ces microorganismes exclusivement réservés aux phosphates en grains, font leur apparition dans les gisements campaniens des États du Levant sous mandat, et qu'ils revêtent une grande fréquence dans une série d'éléments des phosphates Nord africains, y compris ceux de l'Atlas marocain. Ainsi que je l'ai déjà dit, l'attribution aux Radiolaires ne me paraît pas discutable pour les sphérules treillisées simples ou doubles, ornées ou non de piquants, ainsi que pour les individus non moins microscopiques, en forme de cloches également treillisées. Mais elle est incertaine pour celles qui sont oblitérées par des hydrocarbures, ou privées de toute microstructure, ce qui est vrai pour la grande majorité.

Une objection, que j'aurais pu prendre en considération plus tôt, va à l'encontre de ce diagnostic : l'absence d'individus de transition, entre les Radiolaires de dimensions normales et les formes lilliputiennes, réunies dans les grains de taille supérieure à la normale. A ce point de vue, tout se passe comme s'il s'agissait de deux complexes d'organismes bien distincts. Il se peut, comme je l'ai dit plus haut qu'une discrimination soit à faire, et qu'un groupe autre que les Radiolaires joue un rôle important dans la constitution du microplankton, caractérisé par des formes globuleuses. De toute évidence, la question réclame une enquête approfondie qui ne serait pas à sa place dans le présent mémoire.

5° L'association des Diatomées et des Radiolaires dans les phosphates Nord-africains obéit à une règle qui souffre bien quelques exceptions, ce qui ne l'empêche pas d'offrir un certain intérêt : Les grains à Radiolaires de taille normale ne renferment pas de Diatomées, et les grains à Diatomées sont dépourvus de Radiolaires. Les exceptions ne comptent pas assez pour qu'il soit interdit de formuler une conclusion ferme, à savoir, qu'en général, *les grains à Radiolaires prennent naissance en l'absence de Diatomées et vice versa*. Ce que l'on peut traduire en disant que presque tous les grains à Radiolaires se développent aux dépens de vases à Radiolaires très pauvres en Diatomées, et les grains à Diatomées dérivent de vases à Diatomées très pauvres en Radiolaires. Cette explication n'est qu'une des solutions qu'il est possible d'envisager.

Ce qui est vrai pour les grains proprement dits peut ne pas l'être pour de volumineux éléments qui leur sont associés en notable proportion, comme dans les phosphates du Hodna. L'unité est ici un complexe correspondant à un morceau de roche converti en nodule, et renfermant à la fois des Radiolaires et des Diatomées.

6° Primitivement siliceux, les Radiolaires des phosphates ont été fossilisés de maintes façons. Leur silice, originellement à l'état d'opale peut être *quartzifiée*, *phosphatisée*, *calcifiée*, *pyritisée*, *hydrocarbonurée*, voire remplacée par une *matière carbonneuse*.

Existence de deux variétés de radiolarites phosphatisées. — Les phosphates à Radiolaires, qu'on a qualifiés de radiolarites, évoquent l'idée de roches en majeure partie constituées par des Radiolaires et non de roches engendrées dans des conditions de milieu comparables. Cet enseignement découle clairement de la comparaison des radiolarites carbonifères des Pyrénées et de celles du Valanginien de Russie. Les premières procèdent de vases à Radiolaires typiques en ce sens qu'elles sont très riches en Radiolaires de haute mer, à l'exclusion absolue de tout autre organisme et de minéraux détritiques. Les secondes, comme celles du Valanginien de Viatka, sont à base de Radiolaires, accompagnés d'un peu de quartz clastique et de beaucoup de glauconie et de spicules d'Éponges. L'écart entre les deux types est considérable. En toute vérité, seules les radiolarites dinantiennes des Pyrénées réalisent le caractère d'anciennes vases à Radiolaires à rapprocher de celles des mers actuelles.

Foraminifères. — L'absence complète de toute trace de Foraminifères dans les phosphates paléozoïques est une des particularités les plus intéressantes mises en relief par l'étude de ce groupe. Le fait est d'autant plus instructif que le milieu phosphaté conserve dans la perfection les *Foraminifères* qui y sont inclus. Force est de conclure que ces Rhizopodes n'ont pris aucune part à la constitution des phosphates anciens. Il se confirme une fois de plus, que *sauf dans la province des dépôts à Fusulines, les mers paléozoïques ont réalisé des conditions défavorables à l'existence des Foraminifères.*

Dès le Lias, il en va autrement et ses nodules sont susceptibles de renfermer de nombreuses Globigérines. Puis le rôle de ces organismes redevient nul, ou peu s'en faut, dans les phosphates du Jurassique moyen et supérieur. Et il faut arriver à l'Albien supérieur du Bassin anglo-parisien pour que les phosphates fournissent des préparations riches en Foraminifères. Leur fréquence est grande dans certains phosphates cénomaniens du Bassin de Paris, et dans les nodules turoniens des environs de Lille.

A dater du Sénonien, le rôle des Foraminifères change pour ainsi dire du tout au tout. Ceux qui ont été observés dans les formations plus anciennes restent étrangers à la concentration du phosphate de chaux. A l'opposé, les Foraminifères des craies sénoniennes fonctionnent en grand nombre comme centres d'attraction de la matière phosphatée, laquelle remplit les chambres et emprisonne les coquilles demeurées calcaires, dans une enveloppe phosphatée cristalline (I, p. 208). A la vérité, cette manière d'être s'observe pour la première fois dans quelques grains de l'Aptien du Boulonnais. Ce n'est là qu'un des processus de formation des grains, ainsi que nous l'enseigne l'analyse des craies phosphatées de France, et surtout de Belgique et d'Angleterre, dont tous les grains sont loin d'avoir un Foraminifère, comme point de départ.

Les Foraminifères se retrouvent en nombre dans les phosphates du Levant, où ils se signalent par deux particularités nouvelles :

1° Sauf dans une craie de Syrie (région de Palmyre), on constate une indépendance absolue entre les grains et les Foraminifères, quelle qu'en soit la fréquence.

2° Alors que les craies phosphatées du Bassin de Paris sont, par excellence des *craies à Textulaires*, les phosphates de Syrie, de Palestine et de Transjordanie dérivent d'anciennes vases crayeuses, souvent très riches en *Bulimes*.

Dès que l'on pénètre dans le domaine des phosphates à Diatomées de l'Afrique du Nord, les Foraminifères cessent d'intervenir dans la constitution des grains phosphatés. A cette règle, je ne puis guère citer que deux exceptions d'inégale importance : le gisement de Boghari, dans le département d'Alger, remarquable par sa richesse en Foraminifères et l'absence absolue de Diatomées et de certains phosphates des Meskala, de constitution aberrante et d'âge inconnu, qui en sont également très riches (p.747). Hormis ces types exceptionnels, c'est tout au plus si, en moyenne, on en peut observer un représentant par préparation. Cette exclusion, quasi absolue, est d'autant plus frappante que les stériles, alternant avec les horizons phosphatés, sont caractérisés, non par des Diatomées et des Radiolaires, mais par des Foraminifères. Elle s'atténue un peu, cette exclusion, quand on pénètre dans le Bassin des Ganntour et dans les gisements de la région méridionale du Maroc occidental, où ces organismes constituent le noyau de plusieurs grains dans chaque coupe et peuvent exister à l'état libre.

Dans les phosphates plus ou moins riches de l'Atlas marocain, les Foraminifères restent en pleine régression, et des préparations en peuvent manquer complètement.

Plusieurs roches phosphatées de l'Afrique équatoriale française, d'âge inconnu, mais probablement tertiaire, réservent une place très appréciable en importance à des Foraminifères variés (*Orbulina*, *Globigérine*, *Cristellaria*, etc.). Dans l'une d'elles (Gabon), des *Cristellaria* ont concentré un peu de phosphate dans les loges.

Tout bien pesé, le rôle des *Foraminifères* dans la constitution des phosphates les classe en troisième ligne, après les Diatomées et les Radiolaires, conclusion que l'étude de nos craies phosphatées était loin de faire pressentir.

Dans un milieu, tel que celui des phosphates, que l'on sait extrêmement favorable à l'épigénie du carbonate de chaux, n'est-il pas étrange que les Foraminifères opposent une résistance quasi invincible à leur phosphatisation? Nulle part, cette propriété n'est aussi remarquable que dans le Bassin de Paris, où l'on voit d'innombrables coquilles de *Textulaires*, idéalement conservées, remplies de vase crayeuse phosphatisée, et revêtues de phosphate cristallin. Pareille inaptitude à l'épigénie s'observe dans presque toute la série des phosphates à Foraminifères. A titre d'exceptions, des phosphates de Chichaoua et des Ganntour (Maroc) fournissent des exemples de Foraminifères à coquille minéralisée qui se comptent.

Cette résistance se manifeste vis-à-vis d'autres substances, à telle enseigne que, contre toute attente, ce sont les microorganismes comme les Diatomées et les Radiolaires qui, dans les milieux considérés, se prêtent le mieux aux phénomènes de substitution. N'empêche que des Foraminifères silicifiés, peuvent figurer dans des silex subordonnés aux phosphates et que des Foraminifères, en nombre infime il est vrai, ont été épigénisés par de la glauconie dans un nodule phosphaté de l'Agulhas Bank. A la vérité, la conclusion formulée n'en garde pas moins toute sa valeur.

Les nombreux exemples de coquilles de Foraminifères, incluses dans les sables phosphatés, engendrés par la décalcification des craies phosphatées du Bassin de Paris, n'infirmen en rien la généralité de la règle énoncée. Dans ces sables, qui témoignent d'un troisième temps de phos-

phatisation, tous les Foraminifères emprisonnés dans les grains libérés sont épigénisés par du phosphate de chaux (I, p. 217). Il s'agit là d'un épisode relevant des transformations d'origine continentale, et non de phénomènes sous-marins.

Spongiaires. — Si l'on voulait passer en revue tous les phosphates à spicules d'Eponges, il serait nécessaire d'énumérer presque toutes les formations étudiées, depuis et y compris le Cambrien et les gisements ordoviciens du Pays de Galles, jusqu'à ceux du Sénonien d'Europe. D'une manière générale, les spicules s'observent dans les phosphates en nodules, et manquent presque toujours dans les phosphates en grains. Par exception, ils abondent au point que des dépôts doivent être classés comme *spongolithes*. Tel est le cas pour des nodules dinantiens de la Montagne Noire (I, p. 74) et du Cénomaniens de Pologne (I, p. 190), dont les nombreux spicules sont calcifiés. Comme exemples de phosphates riches en spicules, on peut citer un phosphate caradocien du Pays de Galles (I, p. 27), des nodules cénomaniens du Boulonnais (I, p. 181) et de la craie de Rouen (I, p. 184), des « silex » de la craie phosphatée sénonienne de Belgique (I, p. 269), etc.

Il existe, à l'opposé, des phosphates dont les spicules sont, ou complètement exclus, ou rares au point qu'on n'en peut observer un seul dans une série de coupes minces. A la première catégorie appartiennent les phosphates carbonifères à Radiolaires des Pyrénées, les craies phosphatées du Bassin de Paris, et presque tous les phosphates à Diatomées du Nord de l'Afrique.

Il y a non seulement des spicules isolés dans les roches phosphatées, mais des Spongiaires entiers ou morcelés. Leur fréquence est notable dans les nodules des sables verts et du Cénomaniens du Bassin de Paris, en Belgique, dans le poudingue phosphaté de la Malogne, dans les phosphates sénoniens de la Hesbaye, etc.

En ce qui concerne les groupes observés, les *Hexactinellidae*, les *Lithistidae* et *Tetractinellidae* se partagent la grande majorité des spicules. Aux *Calcisponges* se rapportent une foule de spicules observés dans un phosphate ordovicien du Pays de Galles (I, p. 36) et quelques bâtonnets inclus dans les très rares silex de la craie phosphatée du Bassin du Paris (I, p. 234). La fréquence et parfois la prépondérance de représentants d'*Hexactinellidae* dans les phosphates en nodules, subordonnés à des dépôts franchement terrigènes, sont à souligner tout spécialement (phosphates de Pernes-en-Artois (I, p. 185), etc.).

Les conditions de fossilisation ne sauraient être plus variées ainsi qu'en témoignent des spicules en opale et des spicules *calcédonieux*, *quartzifiés*, *calcifiés*, *glauconieux*, *pyritisés*, *hématisés*, *phosphatisés*, *hydrocarburés*, sans parler des types réunissant deux et trois substances différentes et des spicules dissous. A la vérité, l'étude des nombreuses manières d'être observées pourrait donner lieu à de très nombreux développements. La destinée de la silice, libérée dans une multitude de cas, reste souvent inconnue, c'est-à-dire qu'il n'existe pas toujours de phénomènes de silicification, aboutissant ou non à la formation de rognons siliceux.

L'exemple des spicules calcifiés du Bajocien de Longwy, rongés par le phosphate du ciment, témoigne en faveur de l'idée que la calcification des spicules suit de très près la sédimentation et qu'en l'espèce, la libération de la silice est un phénomène sous-marin (I, p. 125). Cette notion a maintenant pour elle force témoignages.

Echinodermes. — Un double rôle leur est dévolu. Ils sont représentés par les *Crinoïdes* et les *Oursins*, en tant qu'organismes contribuant plus ou moins à la fixation du phosphate de chaux,

et par des *Alcyonaires*, qui sont une source d'acide phosphorique pour les dépôts qui les renferment.

Crinoïdes et Oursins. — Leur plus ancienne intervention dans les dépôts passés en revue date de l'Ordovicien du Pays de Galles, où leurs débris sollicitent l'attention par deux états de fossilisation, jusqu'alors inconnus, l'un correspondant à l'épigénie du réseau et au remplissage des mailles par de la matière charbonneuse, et l'autre, par leur transformation en phosphate de chaux (I, p. 31).

Au Dévonien, les restes d'Oursins et surtout de Crinoïdes représentent l'élément fondamental des phosphates du Tennessee, seul exemple actuellement connu d'une pareille fréquence en milieu phosphaté. On y voit des articles, au réseau de calcite phosphatisé, ressortant avec le maximum de netteté, et d'autres qui, fossilisés de la même manière, ont leurs cavités cellulaires remplies de phosphate de chaux.

Dès le début du Jurassique, les restes d'Echinodermes interviennent, à petite échelle, dans la constitution des rognons phosphatés du Bassin de Paris. Il en est ainsi jusqu'au Portlandien compris. On en retrouve dans les nodules albiens du Bassin du Rhône, puis dans ceux du tun des environs de Lille, d'âge turonien. Leurs débris sont d'une grande rareté dans la craie phosphatée du Bassin de Paris, et réduits à quelques-uns dans le conglomérat de base de la craie de Ciply (Belgique).

Leur participation à la formation des phosphates en grains de l'Afrique du Nord est nulle, exception faite pour ceux de la région subatlasique méridionale et du plateau de Marouf (Maroc) qui renferment des débris d'Oursins.

Alcyonaires. — Ces organismes comptent de nombreux spicules dans les rognons phosphatés du Jurassique moyen et du Callovien. De nos jours, leurs représentants renferment du phosphate de chaux en proportions notables (p. 900), si bien qu'il est légitime de supposer qu'ils ne sont pas étrangers à la genèse des nodules phosphatés. Du fait que ceux-ci n'ont pas été engendrés *in situ*, il faut de toute nécessité admettre que la déminéralisation des spicules s'est opérée sur le fond de la mer, et non après leur incorporation aux dépôts.

CRUSTACÉS. — Leur intervention dans la genèse des phosphates est limitée à trois groupes auxquels sont dévolus des rôles très différents.

Ostracodes. — Ils ont été observés une seule fois dans une roche phosphatée du Moyen-Congo, d'âge probablement tertiaire, où ils sont représentés par quelques coquilles trapues, toujours phosphatisées.

Trilobites. — Ces organismes, dont le degré de fréquence a été très élevé au temps de la formation des phosphates les plus anciens, n'ont laissé de débris que dans les dépôts cambriens et ordoviciens. Très nombreux dans les phosphates ordoviciens du Pays de Galles et de Suède, leurs témoins sont déjà très clairsemés dans les nodules gothlandiens. Théoriquement, ils ont pu, eux aussi, être une source d'acide phosphorique pour les rognons et grains des horizons mentionnés. Mais les données rassemblées sur les teneurs en acide phosphorique des carapaces de Trilobites variés ne sont pas favorables à cette opinion (I, p. 99). Et pour tout dire, l'existence de Trilobites, originellement très phosphatés, comme les Crustacés actuels, est loin d'être certaine.

Crustacés Décapodes. — Ils jouent un rôle important dans la constitution de quelques phosphates du Moyen-Congo, à l'état de menus fragments de carapaces, qui ont parfois conservé une microstructure très caractéristique. Un des échantillons analysés en est tellement riche qu'il est très apparenté aux microbrèches de par leurs débris. Fait très énigmatique, leur présence dans les gisements du Moyen-Congo exclut complètement celle des restes de tissu osseux. Si bien que par dérogation à une règle qui ne souffre aucune exception depuis qu'il existe de nombreux Vertébrés sous-marins, leur rôle d'organismes fixateurs de l'acide phosphorique à dose élevée, est, dans l'espèce, réservé aux Crustacés Décapodes.

MOLLUSQUES. — Leurs débris font défaut dans tous les phosphates riches, et, d'une manière générale, dans la plupart des phosphates en grains.

On les voit figurer dans les phosphates ordoviciens du Pays de Galles, parfois avec fréquence, puis on n'en observe plus la moindre trace jusqu'au Jurassique moyen. A partir du Bajocien, ils font partie intégrante de beaucoup de nodules jusqu'au Portlandien inclus.

Aussitôt que les grands Inocérames, au test fragile, interviennent dans la composition de la craie, ces prismes tronçonnés figurent parmi les matériaux constituants. Les sections des phosphates turoniens en renferment quelques-uns, mais c'est dans la craie phosphatée sénonienne à Textulaires qu'ils réalisent le maximum de fréquence. Nulle part, ils ne sont aussi répandus que dans la craie phosphatée à *B. quadrate* de Taplow (Angleterre), dont ils constituent un élément important. Les prismes d'Inocérames paraissent faire défaut complètement dans les phosphates sénoniens des États du Levant sous mandat, ainsi que dans les phosphates de Tunisie, d'Algérie et des grands gisements du Maroc. Des matériaux remaniés des phosphates du plateau de Marouf, dans l'Atlas méridional (Timelilt), en contiennent des débris en voie de phosphatisation. En général, les prismes d'Inocérames ne sont que peu ou point minéralisés par le phosphate de chaux. Les exceptions les plus nombreuses ont été observées dans la craie phosphatée d'Angleterre.

Bryozoaires. — Des fragments de colonies, en nombre fort restreint, ont été rencontrés dans les phosphates ordoviciens du Pays de Galles et dans ceux du Dévonien du Tennessee. Pas un seul témoin n'en a été observé dans les nombreux phosphates jurassiques, crétacés et tertiaires. Des débris de colonies figurent dans des phosphates de la région subatlasique méridionale et du plateau de Marouf (Maroc).

Brachiopodes. — De même que les spicules d'Alcyonaires et les restes de Trilobites, les débris de Brachiopodes jouent, ou sont susceptibles de jouer, un double rôle. Il en est qui, non seulement sont une source d'acide phosphorique pour les roches, mais qui en constituent eux-mêmes l'élément phosphaté. Tel est le cas pour les *Obolus* d'Esthonie (I, p. 42, Pl. II, fig. 6). Les grès dont ils font partie ne sont phosphatés que dans la mesure où les fragments de coquilles d'*Obolus* y sont rassemblés.

En général, la contribution des Brachiopodes fait intervenir uniquement les types articulés, lesquels n'introduisent que peu ou point de phosphate dans les dépôts. Il en est ainsi pour les quelques fragments de Brachiopodes des phosphates dévoniens des États-Unis.

La présence des uns et des autres n'a pas été relevée dans les phosphates d'âge postérieur au Dévonien, autrement dit, n'étaient les phosphates à *Obolus* qu'on pourrait n'en pas signaler l'existence.

Mode de fossilisation des restes d'Invertébrés. — Les manières d'être, réalisées au point de vue minéralogique par les innombrables débris d'Invertébrés, qui concourent à la formation des phosphates de chaux sédimentaires, ajoutent beaucoup à ce que nous savions sur la fossilisation des Invertébrés, en général ⁽¹⁾. A ce sujet, je ne puis que renvoyer aux nombreuses descriptions données, chemin faisant, pour entrevoir l'extrême variété des manières d'être de la fossilisation.

Je me borne à rappeler ici que les organismes calcaires ont fixé dans leurs éléments squelettiques de la *silice* à différents états, du *phosphate de chaux*, de la *matière carbonneuse*, de la *glauconie*, de la *pyrite* et des *hydroxydes de fer*. Quant aux organismes siliceux, ils sont aujourd'hui formés d'*opale*, de *cacédonite*, de *quartz*, de *phosphate de chaux*, de *pyrite*, d'*hydrocarbures solides*, de *calcite*, d'*hydroxydes de fer* et de *produits carbonneux*. L'analyse d'un seul et même groupe, celui des Radiolaires, a révélé l'intervention de *sept* matières différentes, y compris l'*opale* originelle, pour en assurer la fossilisation.

Des témoignages peuvent être invoqués en faveur de la notion de *fossilisation immédiate sur le fond de la mer*. Tel est le cas pour des tissus végétaux phosphatisés, dont la parfaite conservation ne peut s'expliquer autrement.

La présente étude fournit des exemples de fossilisation, sujette à de grandes variations pour un type donné dans un seul et même milieu. C'est ainsi que des Foraminifères du genre *Rotalia*, inclus dans un phosphate de la table de Zimra à Redeyef (Tunisie), affectent les manières d'être suivantes en des points très rapprochés :

- 1° Test calcaire et loges vides;
- 2° Coquille phosphatée et loges vides;
- 3° Loges et test phosphatisés;
- 4° Test calcaire et loges remplies de silice;
- 5° Coquille et contenu des loges silicifiés (II, p. 468).

De pareilles différences ne sont intelligibles que si elles résultent de modifications antérieures à la mise en place des Foraminifères.

Rôle conservateur du phosphate de chaux. — Dès mes débuts, j'ai appelé l'attention sur l'admirable conservation de structures organisées très délicates en milieu phosphaté ⁽²⁾. A vrai dire, la présente étude apporte un témoignage particulièrement décisif en faveur de cette notion, laquelle s'affirme toutes les fois que les organismes monocellulaires entrent en scène. Les nombreux grains phosphatés, pétris de Diatomées, ou qui renferment des Radiolaires et une multitude de représentants d'un microplankton varié, mettent en évidence cette précieuse propriété du phosphate de chaux. Mais nulle preuve n'est plus convaincante que la parfaite conservation

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires (*Mém. Carte Géol. France*, 1916, texte 524 p. et atlas, 56 pl.).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. Géol. Nord*, t. IV, 2, 1897, p. 323).

d'innombrables Bactéries dans les phosphates analysés. L'avenir démontrera que cette aptitude du phosphate de chaux est loin d'avoir été exploitée, comme il convient, dans l'intérêt de la micropaléontologie.

Vertébrés. — La question des débris osseux, inclus dans les roches phosphatées, revêt une importance particulière, en raison du rôle qui a été attribué aux Poissons et autres Vertébrés marins dans la genèse des gisements de phosphate de chaux.

Aucun fragment n'en a été observé dans les nodules cambriens de Suède et les phosphates ordoviciens du Pays de Galles, mais dans le grès de Downton, il en existe de nombreux débris. Dès leur apparition, on constate la présence de maints éléments privés de toute trace de microstructure caractéristique, qu'on n'est autorisé à rapporter au tissu osseux des Poissons que par suite de leur association à des fragments typiques et de leurs propriétés, telles que coloration, morphologie, dimensions et caractères optiques, qui sont absolument les mêmes de part et d'autre.

Entre parenthèses, cette absence de microstructure, constatée dans beaucoup de débris de tissu osseux du Silurien supérieur, intéresse au plus haut degré le diagnostic de matériaux, d'âge plus ancien que les restes de Poissons les plus archaïques connus, et que j'hésite à signaler depuis longtemps, à défaut de l'argument décisif tiré de la microstructure.

La concentration de fragments de tissu osseux dans une seule coupe mince du grès de Downton, conséquence d'une préparation mécanique très prononcée, en réunit beaucoup plus de représentants que je n'en ai exhumés, au total, dans tous les phosphates paléozoïques et jurassiques analysés. N'était un fragment de brèche ossifère, observé dans les phosphates dévoniens du Tennessee, que mes recherches dans ces phosphates seraient restées complètement stériles. En particulier, les phosphates carbonifères des Pyrénées et de la Montagne Noire n'en ont pas fourni un seul débris, en dépit du grand nombre de sections passées en revue. J'en puis dire autant des phosphates permien des Montagnes Rocheuses, dont, il est vrai, je n'ai étudié qu'un nombre très limité de coupes minces.

En suivant l'ordre chronologique des terrains, il faut arriver au Portlandien du Boulonnais, pour retrouver quelques restes de tissu osseux dans les phosphates.

Leurs débris manquent, ou peu s'en faut, dans les phosphates infracrétacés du Bassin de Paris, alors qu'on en compte plusieurs dizaines dans chaque coupe des rognons phosphatés de l'Albien de Cambridge (Angleterre). Puis, ils redeviennent invisibles jusqu'au Turonien exclu.

Les craies phosphatées inaugurent un régime nouveau, en ce sens que la présence des débris de tissu osseux devient constante dans les préparations. Déjà dans les phosphates sableux d'âge turonien du Cambrésis, résultant d'un phénomène de décalcification et de concentration des grains, on en compte plusieurs dizaines par coupe. Dans les phosphates sénoniens de l'Europe occidentale, leur degré de fréquence varie de quelques fragments à quelques dizaines par section. Notons en passant, que des débris, en proportion variable mais plutôt faible en moyenne, sont dépourvus de microstructure caractéristique.

Comparés aux phosphates de nos craies à Textulaires, ceux des États du Levant sous mandat réalisent un faciès à part, au double point de vue de la fréquence et des manières d'être des débris de tissu osseux. Jamais, et à beaucoup près, ceux-ci n'ont joué un tel rôle et revêtu une

telle diffusion. Aussi, nombreuses sont les microbrèches typiques. Dans tous les cas, les représentants du tissu osseux retiennent l'attention par le façonnement des fragments susceptibles de figurer dans les coupes par de nombreuses sections subrectangulaires, comme s'ils réalisaient une forme prismatique et par une proportion exceptionnellement élevée de fragments privés de toute microstructure.

Une pareille abondance de restes submicroscopiques de Vertébrés s'observe dans une partie des phosphates d'Égypte, où les débris à faciès prismatique se réclament également d'une très grande fréquence. C'est peut-être dans ces phosphates que les fragments privés de structure sont le plus répandus auquel cas ils viennent de beaucoup au premier rang.

Les restes de tissu osseux font partie intégrante de tous les phosphates de la Tunisie et de l'Algérie. Par exception, ils y sont assez nombreux pour constituer de véritables brèches (Maëstrichtien de Gafsa). En moyenne, leur diffusion est moindre dans ceux du Maroc. Seuls échappent à la règle, les phosphates des deux couches inférieures de Chichaoua, susceptibles d'être en majeure partie composés de fragments de tissu osseux.

CONCLUSIONS.

Ce coup d'œil d'ensemble sur la distribution des restes de tissu osseux dans les gisements de toutes qualités, qui s'échelonnent presque d'un bout à l'autre des temps géologiques, fournit les éléments d'une loi qu'il y aura lieu de rappeler dans la discussion du problème de la formation des phosphates de chaux sédimentaires : D'une manière générale, *les restes de tissu osseux sont très rares ou manquent dans les phosphates pauvres, alors qu'ils sont très répandus dans les phosphates plus ou moins riches.* Il est nécessaire d'ajouter que les grands gisements permien des Montagnes Rocheuses, échappent à cette règle — si j'en juge par le très petit nombre d'échantillons analysés.

Peut-être le fait doit-il se traduire autrement et convient-il de dire que, *règle générale, la fréquence des débris de tissu osseux augmente à mesure que les gisements sont plus récents*, parce que les Vertébrés marins, source des fragments de tissu osseux, se sont multipliés avec le temps.

Considérations sur la microstructure des débris de tissu osseux. — Avec le grès de Downton, qui est pour nous le plus ancien gisement, contenant des débris de tissu osseux d'une authenticité indiscutable, nous avons appris qu'une partie de ces débris se singularise par l'absence absolue de microstructure caractéristique. Un coup d'œil d'ensemble sur la répartition des fragments de tissu osseux dans le temps et dans l'espace, vient de nous remémorer l'extrême fréquence, et parfois la prépondérance de ce caractère négatif dans toute une série de phosphates en grains.

Il n'est peut-être pas superflu de rappeler, une fois encore, qu'abstraction faite de l'absence de canalicules et de corpuscules osseux, toutes les autres propriétés sont identiques de part et d'autre. En particulier, nulle différence ne les sépare du point de vue optique. Aussi ne peut-on révoquer en doute que les débris privés de structure procèdent, eux aussi, de restes de Vertébrés.

De toute nécessité, il faut choisir entre deux explications :

1° Cette microstructure existait originellement dans la totalité des individus, et elle a été détruite dans beaucoup d'entre eux.

2° Elle a toujours fait défaut.

Observons d'abord que les deux catégories de types en présence ne sont pas reliées par des stades intermédiaires, correspondant à des états de conservation différents, et qu'il n'est pas concevable que des débris identiques, situés côte à côte dans le même milieu, aient subi des sorts très différents (L'exemple des phosphates de Transjordanie qui nous font assister à la transformation radicale de phosphates de type banal en phosphates largement cristallisés, impliquant une destruction complète de la morphologie des éléments, nous enseigne que des corpuscules osseux sont encore discernables dans certains éléments. Aussi, ne peut-on admettre que la microstructure originelle ait disparu complètement d'une foule de fragments qui voisinent avec d'autres de conservation parfaite dans des phosphates de type normal.

Pour conclure, on peut dire, en toute certitude, croyons-nous, que *le tissu osseux d'un grand nombre de Vertébrés, vivant au temps de la formation des phosphates, était caractérisé par une structure indifférenciée, massive et non poreuse, dans tout ou partie des éléments du squelette*. Et l'on peut ajouter qu'au total, *plus de la moitié des débris de tissu osseux, inclus dans les phosphates de la fin du Crétacé et du commencement du Tertiaire, était originellement dépourvue de microstructure*. Si telle est la vérité, le fait est à retenir pour l'interprétation de matériaux à faciès de fragments de tissu osseux, dépourvus de canalicules et de corpuscules osseux, observés dans des terrains paléozoïques très anciens, qui n'ont jamais fourni la plus petite trace de restes macroscopiques de Vertébrés d'authenticité non douteuse.

Fragmentation et morphologie des restes de tissu osseux. — Les débris de tissu osseux sont dignes d'intérêt, non seulement pour les raisons qui viennent d'être exposées, mais par le mécanisme du morcellement des ossements et la morphologie des fragments. Dans les dépôts phosphatés, s'échelonnant du Silurien au Sénonien d'Europe inclus, la fragmentation des ossements n'obéit à aucune règle, et les débris affectent des formes quelconques à l'état de grains, d'éclats et d'esquilles, qui ont enregistré ou non des traces d'usure. Dès qu'on aborde l'étude des phosphates des États du Levant sous mandat, le faciès des fragments de tissu osseux, souvent réunis par centaines dans une seule et même coupe mince, devient aberrant. Aux débris de forme quelconque et d'identification facile, par suite de leur microstructure typique, s'ajoutent, en proportions variables, des éléments de forme allongée, grossièrement prismatiques, plus ou moins tronçonnés, ornés de quelques clivages transversaux, et montrant ou non des sortes de clivages longitudinaux. Des phosphates en sont pétris, au point de rentrer dans la catégorie des microbrèches. On sait déjà que pareil faciès existe également dans les phosphates de Tunisie, d'Algérie, et qu'il est moins développé dans ceux du Maroc.

Il est certain que le débitage en matériaux de forme subprismatique, parfois très allongés, a été préparé et facilité par une série de plans de moindre résistance, orientés en gros suivant des directions orthogonales, et qu'il n'est pas nécessaire de faire intervenir des actions dynamiques intenses pour expliquer le morcellement. La preuve en est que les fragments subprismatiques, loin d'accuser des traces d'usure révélatrices, ont généralement gardé des angles vifs. Peut-être la genèse des plans de débitage facile est-elle la conséquence de la cristallisation très large des matériaux, et ces plans sont-ils assimilables à des clivages ? Toute autre interprétation me paraît inacceptable. Dans cette conception, la cristallisation des débris est forcément antérieure au morcellement et, partant, à la mise en place des matériaux. Il s'agit, encore une fois, d'une modification réalisée sur le fond de la mer.

Cas particulier des débris de tissu osseux des phosphates du Hodna. — Autant la forme des éléments tend vers des contours géométriques dans le cas précédent, autant elle se révèle irrégulière et capricieusement découpée dans les gisements du Hodna. En l'espèce, les débris affectent la forme de lames allongées, rectilignes, ondulées, parfois étranglées, fréquemment fourchues, et pourvues ou non de sortes de clivages longitudinaux, susceptibles d'être très nets. Par exception, des matériaux de cette espèce ont conservé des cavités remplies d'hydrocarbures, très apparentes, qui mettent en évidence la structure poreuse et celluleuse du tissu osseux. Quant aux propriétés optiques, elles se confondent avec celles des débris de type normal. De surcroît, il existe une sorte de balancement entre le degré de fréquence de ces débris de caractère aberrant et celui des autres, leur abondance entraînant la rareté en l'absence des fragments ordinaires et *vice versa*. Bref, il y a toutes raisons de croire qu'en dépit de leur étrange morphologie, les débris en forme de lamelles relèvent du groupe des Vertébrés. Si l'on ne perd pas de vue le fait que de nombreux grains des phosphates en question ont été déformés au point d'être méconnaissables et que le gisement est celui qui a enregistré le plus d'actions mécaniques, on est tenté d'expliquer la lamellisation des débris par une sorte de laminage. Dans cette hypothèse, l'association des débris étirés et de restes intacts s'explique difficilement.

Les phosphates du Hodna se signalent encore par la présence dans les trois domaines envisagés, de débris reproduisant l'aspect de l'*odontolite* ⁽¹⁾. Nombreux sont les éléments de petite taille qui se détachent à l'œil nu, avec une teinte bleu turquoise, nuancée ou non de vert, et souvent avec un reflet opalescent. Les fragments de cette catégorie n'ont rien d'aberrant dans leur morphologie, et tous ont gardé intacte la structure caractéristique du tissu osseux. Cette dernière observation est conforme au témoignage de A. Lacroix, qui a démontré, par l'analyse de nombreux échantillons, que la transformation chimique profonde, subie par le tissu osseux converti en odontolite, en respecte la structure anatomique dans tous ses détails. Le degré de fréquence de ces matériaux est des plus variables. Tel échantillon en est extrêmement pauvre; sur les cassures de tel autre, on en peut compter des dizaines. Au total, la masse d'odontolite, correspondant à ces débris, dépasse de beaucoup en importance celle que représentent les ossements et dents fossiles, couvertes en odontolite, découverts jusqu'à présent.

A. Lacroix, qui a fait connaître les propriétés de cette substance, enseigne que sa composition chimique, déterminée par Ad. Carnot, se traduit par la substitution du phosphate d'alumine et de fer, à une proportion variable de phosphate tricalcique, et par la fixation du fluor, à dose très notable. Ajoutons, par parenthèse, qu'une odontolite de la Collection de Minéralogie de l'École des Mines renferme 3,45 p. 100 de fluor, à l'état de fluorure de calcium. A ce sujet, il est intéressant de noter que la teneur en fluor de neuf de mes échantillons de phosphate à odontolite est supérieure à 2 p. 100 pour huit d'entre eux, qu'elle est de 1,93 pour le plus pauvre et de 2,96 p. 100 pour le plus riche. Dans tous la proportion de chlore est très faible.

Rien ne fait supposer que la transformation des fragments se soit opérée *in situ*; par contre, une donnée est de nature à accréditer l'opinion contraire. Un même échantillon, mieux que cela,

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Diffusion de l'odontolite dans les phosphates Suessoniens du Hodna (Dép. de Constantine) [*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXII, 1941, p. 413].

⁽²⁾ A. LACROIX. — T. IV, 2^e part. 1910, p. 577-579.

une même coupe mince, montrent étroitement associés des débris de type normal et des fragments constitués par de l'odontolite. Cette particularité me paraît signifier qu'à l'exemple des grains de phosphate, les restes de tissu osseux, empruntés en des points différents du bassin générateur, ont été mis en place tels qu'on les voit aujourd'hui, les uns non modifiés, et les autres convertis en odontolite.

Observons encore qu'en l'espèce, la genèse de la fausse turquoise se réclame d'un milieu marin, et non continental, comme c'est le cas pour les ossements et dents fossiles des gisements producteurs d'odontolite, connus jusqu'à présent (Gers, Tarn, Dordogne, etc.).

g. COPROLITHES.

La genèse des coprolithes est tellement liée à l'activité organique que le moment est venu d'en aborder l'étude systématique. Le terme coprolithe a souvent été employé pour désigner par abus de langage, des concrétions et des nodules, d'origine foncièrement différente de celle des coprolithes proprement dits. La confusion s'est même étendue aux grains de phosphate, que les auteurs, rares en vérité, ont parfois qualifiés de coprolithes. Il convient, en bonne logique, de réserver ce vocable aux matériaux répondant à l'étymologie du mot, c'est-à-dire à des excréments d'animaux.

J'ignore à quelle époque les coprolithes commencent à figurer dans les roches phosphatées, ignorance qui peut tenir à une double cause : destruction intégrale des coprolithes sur le fond de la mer, ou impossibilité de les identifier. De fait, je n'ai pu en reconnaître un seul dans les phosphates paléozoïques, jurassiques et infracrétacés. Et c'est seulement par le *Macropoma Mantell* que j'en sais l'existence dans le Cénomanien et le Turonien. Au microscope, je n'ai réussi à les déterminer, en toute certitude, qu'en partant des coprolithes, caractérisés comme tels à l'œil nu.

Je n'ai pu m'assurer de l'existence de coprolithes authentiques dans les craies phosphatées de France, de Belgique et d'Angleterre, car je ne suis pas arrivé à en reconnaître un seul au microscope. La question change d'aspect dès qu'on aborde l'étude des phosphates des États du Levant sous mandat, d'Égypte, de Tunisie, d'Algérie et surtout du Maroc. J'ai déjà noté que dans le Bassin de Kourigha, leur degré de fréquence est assez élevé pour qu'on les puisse compter parmi les caractéristiques de la plupart des phosphates⁽¹⁾. Mais dans le Bassin des Ganntour, ainsi que dans les gisements de la région méridionale du Maroc occidental et dans l'Atlas de Marrakech, leur degré de fréquence s'est considérablement réduit en moyenne. J'ajoute qu'il m'a été impossible d'en identifier un seul dans les phosphates de l'Agulhas Bank.

Le célèbre gisement de Kourigha (Maroc) se prête tout particulièrement à l'étude des coprolithes, du fait que le phosphate exploité est meuble, et qu'il est possible de les collectionner en grand nombre dans les matériaux éliminés par le criblage des phosphates bruts. Ce sont des éléments de forme générale cylindrique, dépassant rarement 2 centimètres de long et mesurant au plus 1 centimètre de diamètre. Leur section transversale est circulaire et, par exception, elliptique. Complètes, ils sont rétrécis et arrondis à leurs extrémités, et parfois terminés par des

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les coprolithes des phosphates nord-africains (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCIII, 1936, p. 217).

cônes surbaissés à sommet arrondi. Tous ont une surface lisse, l'unique ornementation consistant en étranglements transversaux superficiels, non équidistants, toujours peu nombreux, et absents dans la majorité des individus. Beaucoup d'entre eux sont fragmentaires, d'aspect usé, et parfois convertis en débris qui ne trahissent pas toujours leur origine à l'œil nu. Leur teinte est le plus souvent gris très clair et parfois jaunâtre. Observés dans les exploitations, ils gisent dans toutes les positions, sans trace de classement, et toujours avec des dimensions très supérieures à celles des grains phosphatés les plus volumineux.

Au microscope, les coprolithes phosphatés nord-africains affectent une morphologie très variée, témoignant d'une fragmentation facile et d'une certaine fragilité à l'origine. En tout cas, les éléments incomplets et de forme irrégulière prédominent de beaucoup, en moyenne. Les uns se révèlent d'une homogénéité absolue, tandis que les autres accusent une différenciation très particulière de la matière.

Les matériaux complètement indifférenciés l'emportent de beaucoup dans les phosphates du Levant et dans ceux d'Égypte, sans qu'à ma connaissance leur présence soit trahie par des représentants macroscopiques identifiables à l'œil nu. Aussi, leur vraie nature m'a-t-elle échappé, aussi longtemps qu'elle n'a pas été reconnue dans les phosphates de Tunisie, d'Algérie et du Maroc. Ce sont de gros éléments, qu'on est tenté d'assimiler à de tous petits nodules, représentés par de nombreuses sections, incolores, faiblement jaunâtres, ou teintées en jaune de différentes nuances. Leur taille, non moins que leur parfaite limpidité, sollicitent immédiatement l'attention dans l'examen des coupes.

Tout différents d'aspect et de constitution, les matériaux du second groupe englobent une matière pigmentaire très fine, inégalement répartie, concentrée par places, distribuée en taches, en zones régulières ou non, en traînées parallèles, divergentes, susceptibles d'être ondulées, parfois contournées, repliées sur elles-mêmes, voire constituées de manière à revêtir un aspect tordu. Il en est, parmi ces éléments, qui reproduisent de façon très fidèle le faciès de certaines pâtes vitreuses, chargées de traînées pétrasiliceuses. Ces produits, si variés de physionomie, évoquent l'idée d'une matière hétérogène, plastique, déformée, étirée et comme pétrie (Pl. XXI, fig. 66). Tels sont les coprolithes que j'appelle typiques, du fait que leur diagnostic ne soulève jamais la moindre difficulté.

Les matériaux de cette seconde catégorie sont surtout répandus dans les phosphates de Tunisie, d'Algérie et du Maroc.

Les deux variétés de coprolithes ont en commun deux propriétés principales :

1° Tous sont constitués par du phosphate de chaux, n'exerçant pas la moindre action sur la lumière polarisée;

2° Contre toute attente, ces coprolithes sont, à de rarissimes exceptions près, complètement privés d'inclusions minérales ou organiques, caractère négatif qui m'a fait exclure ces matériaux des vrais coprolithes, aussi longtemps que les coprolithes typiques, à l'œil nu, n'ont pas été analysés au microscope. En abordant leur étude, on devait logiquement s'attendre à y observer de nombreux représentants de microplankton des mers génératrices des phosphates, ainsi que des débris osseux fournis par les Vertébrés marins classés parmi les carnassiers. En dépit de la fréquence des dents fossiles et autres débris macroscopiques dans les gisements étudiés, il est de toute impossibilité d'identifier le plus petit fragment de tissu osseux, inclus dans la totalité

des coprolithes examinés au microscope. Pour résoudre cette énigme, on ne voit guère que deux interprétations à invoquer : ou bien, tous les matériaux d'origine pélagique, ingérés par les Poissons et Reptiles marins, restes de tissu osseux compris, ont été assimilés, au point que le plus petit vestige en a disparu; ou bien, le régime des Vertébrés en cause n'avait rien de carnassier, ce qui expliquerait l'absence du moindre représentant de tissu osseux. Tout en reconnaissant que la seconde alternative rend mieux compte que la première de l'exclusion complète des témoins de tissu osseux, je m'interdis de conclure, faute de pouvoir me prononcer en connaissance de cause.

En somme, l'étude des restes de Vertébrés qui ont concouru à la formation des phosphates nous met en présence de deux problèmes non résolus : *l'absence de toute structure caractéristique dans la majorité des nombreux restes de tissu osseux observés, et l'absence d'inclusions, tant organiques que minérales, dans les coprolithes authentiques.*

CONCLUSIONS.

De notre étude, il ressort avec évidence que *les dépôts phosphatés ont reçu des organismes monocellulaires de nature végétale et animale, une contribution organique extrêmement prépondérante.* Tel est l'enseignement qui surpasse en intérêt tous ceux qui découlent de l'étude de la participation organique à la genèse des phosphates sédimentaires.

Abstraction faite de très rares débris de tissu osseux, convertis en nucléus, ce sont les seuls restes organiques qui figurent en inclusions dans l'unité grain, c'est-à-dire dans l'élément essentiel des phosphates. Et nous savons que dans le cas des Foraminifères et Radiolaires, la coquille de ces Rhizopodes joue, ou peut jouer, un rôle de premier plan, en ce qui concerne la concentration du phosphate de chaux. Autrement dit, ces organismes n'interviennent pas seulement du point de vue numérique, et par la quantité de matière minérale qu'ils représentent à eux tous. Chose certaine, leur intervention entraîne celle d'une masse de matière organique, que l'on peut qualifier de considérable, sans abuser du mot. Rien ne saurait mieux nous convaincre de cette vérité que l'examen au microscope des grains de phosphate de Gafsa (II, Pl. XXIII, fig. 70), pétris de valves de Diatomées, c'est-à-dire d'organismes qui, par rapport à leur taille, sont exceptionnellement riches en protoplasma. L'analyse des phosphates de Djebel-Onk, bourrés de restes variés de microplankton (II, Pl. XXIX, fig. 89 et 90) est non moins probante à cet égard. L'étude des conditions de genèse des grains nous apprendra que c'est bien dans le milieu même où vivaient Diatomées, Radiolaires et Foraminifères, sans parler des autres représentants du microplankton, que le phosphate de chaux s'est concentré en grains. Cette constatation faite, on est tout naturellement enclin à voir dans la présence et l'abondance de cette matière organique un des facteurs de la formation des éléments phosphatés.

Dans un autre ordre d'idées, l'intervention de cette grande masse de matière organique s'est révélée d'une grande efficacité. En m'exprimant de la sorte, j'ai en vue la genèse des hydrocarbures, que l'on sait élaborés en quasi-totalité avant la mise en place des matériaux, c'est-à-dire dans le domaine même où les microorganismes ont concouru à la formation des matériaux phosphatés.

Tout riche qu'il soit, ce tableau resterait incomplet, si je ne rappelais l'existence d'innombrables *Bactéries* dans les milieux phosphatés qui ont été l'objet de nos investigations.

h. GANGUE DES PHOSPHATES.

Le problème de la cimentation des matériaux phosphatés revêt un double intérêt : théorique, en ce qu'il pose la question du milieu générateur des gangues, et pratique, du fait qu'il est de grande importance pour l'enrichissement artificiel. La question se pose sous des aspects différents selon qu'il s'agit des phosphates en grains ou des phosphates en nodules, que je vais considérer successivement.

GANGUE DES PHOSPHATES EN GRAINS.

Les phosphates en grains constituent un ensemble de physionomie variée, dont les termes s'échelonnent des phosphates meubles aux types composés de grains solidement agrégés.

1° *Phosphates meubles*. — Les phosphates en grains non agglutinés se réclament de deux origines distinctes. Il en est, comme ceux du Maroc (Kourigha), dont l'état sableux signifie qu'ils n'ont jamais été consolidés. Aucune objection ne saurait prévaloir contre les arguments qu'il est possible d'invoquer pour le démontrer (p. 243). Tout autre est le cas des sables phosphatés, autrefois exploités aux environs de Mons et dans le Nord de la France. Ceux-ci représentent un résidu de dissolution des craies phosphatées soumises à l'action des agents météoriques, c'est-à-dire qu'ils sont redevables de leur existence à des phénomènes d'enrichissement naturel (I, p. 216). Ce ne sont donc pas d'anciens sédiments, au même titre que les sables phosphatés de Kourigha. Pour tout dire, l'état meuble est *originel*, pour les uns, et *acquis* pour les autres.

2° *Phosphates cohérents*. — Ils sont tels en raison de la présence d'une gangue, dont les variations de composition sont assez limitées, par suite de son origine en milieu pélagique. Cette gangue réalise deux manières d'être fort dissemblables :

A. Quoique remaniés, les matériaux phosphatés, engendrés sur des fonds crayeux, gisent dans un milieu également crayeux. Il en est ainsi pour les phosphates des craies sénoniennes du Bassin de Paris, de la Belgique et d'Angleterre. Dans le langage courant, on les désigne sous le nom de *craies phosphatées*. A la vérité, *ce sont des craies additionnées de grains de phosphate*. En l'espèce, il est de toute évidence que la gangue est originelle;

B. Une fois formés, les grains de phosphate sont extraits de leur milieu générateur, comme dans le cas précédent, puis entraînés dans un tout autre milieu. Les phosphates nord-africains fournissent d'excellents types de cette façon d'être, illustrée par d'innombrables grains bourrés de Diatomées, inclus dans un ciment qui n'a jamais fourni un seul représentant de ces Algues. De ce nombre, sont les minerais du Bassin de Gafsa.

Il est à noter qu'en très grande majorité les phosphates de cette catégorie font ressortir une différence radicale entre le milieu générateur des grains et celui qui fournit les éléments du ciment.

Cas des phosphates à gangue de calcite. — En ce qui concerne les phosphates à gangue de calcite, très nombreux en Tunisie centrale, dans le domaine du Djebel-Onk, au Maroc, etc., il n'est pas

du tout évident, *a priori*, que cette gangue procède d'un ciment élaboré sur le fond de la mer. La question peut être résolue par deux voies différentes :

1° Les craies phosphatées fournissent des exemples très nets de gangue crayeuse typique, passant par une foule d'intermédiaires à une gangue de calcite, plus ou moins largement cristallisée, sans nul témoin de la vase crayeuse originelle;

2° L'étude de nombreux phosphates, composés de grains cimentés par de la calcite, pose la question de l'existence d'une gangue *originelle*, toutes les fois que ces phosphates ne sont pas assez riches pour que leurs éléments se touchent. C'est le cas pour une multitude de phosphates trop pauvres pour être livrés à l'exploitation. Lorsqu'il en est ainsi, le maintien en place des grains, isolés de toutes parts, requiert l'intervention d'un ciment originel, faute de quoi les grains devraient être contigus. Rappellerai-je à ce sujet qu'une condition *sine qua non* pour le développement des silex, en milieu phosphaté, est l'existence d'une gangue calcaire originelle, dans laquelle les grains de phosphate sont loin de se toucher.

Les faits observés dans cet ordre d'idées sont assez nombreux et précis pour conclure que *les phosphates à gangue de calcite sont toujours des phosphates à ciment originel*, et non des phosphates dont les éléments ont été agglutinés tardivement. Autrement dit, la gangue de calcite est d'origine première sédimentaire, au même titre que la gangue argileuse et marneuse.

D'après le peu que je sais sur les phosphates permien des Montagnes Rocheuses, il m'est difficile de fixer, en toute assurance, le groupe auquel il convient de les rattacher. Leur gangue est calcarifère, et elle l'était bien davantage à l'origine. Aussi suis-je porté à croire qu'ils ont pris naissance sur des fonds calcaires, et qu'ils se sont concentrés sur des fonds de même nature.

Cas des phosphates consolidés sans gangue. — Il existe des phosphates en grains, actuellement privés de gangue, composés d'éléments déformés, qui combrent tous les vides en faisant l'office de ciment. Les gisements du Hodna en fournissent d'excellents exemples, caractérisés par une grande cohérence. Une question se pose, pour ainsi dire d'elle-même, pour les phosphates de cette catégorie. Y a-t-il élimination d'un ciment originel, au cours de la déformation des matériaux phosphatés par compression? L'existence des vides intergranulaires est-elle une condition nécessaire pour que la déformation des éléments atteigne le degré indiqué? Il est malheureusement impossible d'invoquer un seul fait à l'appui de l'une ou l'autre solution.

CONCLUSION.

S'il est vrai que le ciment des phosphates en grains se réclame d'une composition généralement simple, et peu variée dans l'ensemble, il est non moins exact qu'il reflète souvent l'extrême instabilité du milieu générateur, par une composition très changeante dans un domaine restreint. Par exemple, dans un phosphate de la couche II de Redeyef (Table de Zimra), la gangue, bien que réduite à un rôle infime, est tour à tour *argileuse*, *argilo-calcaire*, *calcaire*, *calcaréo-phosphatée* et *phosphatée* (II, p. 470). A cet égard, les phosphates du Maroc contrastent avec ceux de Tunisie, par la grande uniformité de caractères que trahit leur analyse micrographique.

L'intervention des gangues est pour les phosphates en grains, tantôt, et le plus souvent, un élément de dépréciation, en ce sens qu'elles sont stériles, et qu'au surplus, elle leur communique, parfois, une dureté nuisible à leur valeur marchande et, tantôt, un facteur d'enrichissement,

susceptible d'être très appréciable. Il en est ainsi, notamment, lorsque le ciment est phosphaté à une échelle notable, comme c'est le cas pour des phosphates des Montagnes Rocheuses et de la traînée correspondant à la Tunisie centrale et à son prolongement dans le département de Constantine.

MATÉRIAUX CONSTITUANTS DE LA GANGUE DES PHOSPHATES EN GRAINS.

Le ciment des phosphates en grains est originellement *calcaire, marneux* et, exceptionnellement *argileux*. Lorsque les phénomènes d'épigénie interviennent, il est de nature moins simple.

Des actions secondaires y introduisent du *phosphate de chaux*, de la *silice*, de la *pyrite de fer*, de l'*hématite* parfois et du *gypse*. Nous savons déjà qu'en dépit de ce petit nombre d'éléments constitutifs, dont quelques-uns jouent un rôle accessoire, voire accidentel, la composition des minerais est loin d'être toujours très simple et uniforme. Dans le détail, elle est même susceptible d'être très variée, si bien qu'il existe des coupes minces dont les gangues changent de composition en des points très rapprochés.

Carbonate de chaux. — Ses modalités sont nombreuses. Par exception, il réalise le caractère d'une ancienne vase crayeuse très fine. Tel est le cas pour les phosphates sénoniens du Bassin de Paris, pour ceux de Syrie, du Djebel-Sif (Tunisie), etc. Le plus souvent, il a subi un commencement de cristallisation qui transforme le ciment en un agrégat de très petits éléments moulés les uns sur les autres. Cette modification est réalisée à grande échelle dans le Bassin des Gantour. A titre plutôt exceptionnel, cette calcite finement granuleuse se borne, soit à envelopper les grains d'une mince couronne lorsqu'ils sont isolés de toutes parts, et interrompue à leurs points de contact dans le cas contraire. Une autre manière d'être, plutôt rare, remplit tous les intervalles libres entre les grains qui se touchent d'un élément doté de l'unité d'orientation. Il est exceptionnel que la calcite cristallise largement, au point d'englober des dizaines de grains phosphatés dans une plage s'éteignant d'un seul coup.

De loin en loin, la structure d'agrégat permet aux grains de réaliser une forme subrhomboédrique. Il est même possible d'observer des rhomboédres parfaits, développés à raison d'un seul par vide intergranulaire qu'il remplit incomplètement. Les formes rhomboédriques ne deviennent fréquentes ou banales qu'en présence de la matière argileuse, association qui est loin d'être toujours suffisante pour engendrer des rhomboédres. Ce sont des cristaux, simples ou encapuchonnés, de taille toujours petite. Par exception, j'ai observé des *rhomboédres composés*, rappelant ceux des craies à durillons du Bassin de Paris, dans un calcaire phosphaté, au mur de la couche inférieure de Rebiba (II, p. 395). Une dernière manière d'être, pour le moment unique, dans les dépôts phosphatés, est réalisée dans un phosphate du Bassin des Gantour, dont le ciment calcaire renferme de petits rhomboédres, parfaits de forme, mais *vides* et réduits à des traits qui en dessinent les contours avec une grande netteté [couche H de la colline Dekrakra (p. 721)]. C'est un nouveau témoignage à ajouter à ceux que j'ai signalés, à plusieurs reprises, en faveur de l'accroissement endogène de cristaux, en milieu sédimentaire.

Matière argileuse. — Elle forme rarement des plages de ciment sans le concours du carbonate de chaux, ou en l'absence de la pyrite. Il s'agit invariablement d'une seule et même variété

phylliteuse, non identifiable au microscope, teintée en jaune, ou en jaune brunâtre, suivant l'épaisseur des coupes, et polarisant avec des teintes très vives du premier ordre. Seule, et presque toujours en compagnie du carbonate de chaux, différencié ou non, elle donne naissance à des flots, ou à des traînées de toute importance. Sous cette forme, elle est susceptible d'être éliminée par les traitements mécaniques qui visent à l'enrichissement des phosphates de chaux. Mais il arrive, fréquemment, dans les minerais à gangue plus ou moins argileuse, que cette matière recouvre les grains d'une sorte d'enduit, dessinant entre les nicols croisés une fine auréole d'épaisseur très régulière. En l'espèce, tout se passe comme si la matière argileuse, d'ailleurs identique à celle de la gangue faisait partie intégrante des grains, dont elle est difficilement séparable. Sous ce faciès, la matière argileuse figure autour de tous les éléments dans certains phosphates des Bassins de Gafsa et du Djebel-Onk, sans jamais représenter un pourcentage très élevé.

La matière argileuse intervient en proportion relativement élevée dans la constitution des phosphates argilo-ferrugineux qui ravinent les couches II et I de Kourigha (p. 693). Pierre Urbain, qui a réussi à l'identifier par les rayons X, l'attribue à la *sépiolite*, c'est-à-dire à une argile magnésienne. J'ignore pour le moment dans quelle mesure ce type d'argile est développé dans les formations phosphatées du Maroc.

Lorsque, par exception, les hydrocarbures imprègnent la gangue des phosphates en grains, ils peuvent se développer dans des passées marneuses. Le gisement du Kef-Sonétir (Kalaa-Djerda, Tunisie) en fournit un bel exemple (II, p. 411, Pl. XX, fig. 61).

Phosphate de chaux. — Un second temps de minéralisation correspond au développement dans la gangue et à ses dépens d'une quantité très variable de phosphate de chaux, tantôt négligeable et, tantôt fort appréciable, voire très importante (Afrique Équatoriale française). Dans presque tous les cas observés, il se substitue au carbonate de chaux. Par exception, son développement est lié à l'existence d'une armature argileuse. Règle à peu près générale, le phosphate dont il s'agit est amorphe, mais il exerce parfois une faible action sur la lumière polarisée. Il peut également manifester une tendance à se différencier en globules (Valanginien de Viatka, I, p. 171), et surtout acquérir un état cryptocristallin, engendrant des couronnes à structure fibro-radiée ou zonaire, autour des grains phosphatés (Rebiba et Le Kouif). Dans un phosphate de la couche supérieure de Rebiba, un ciment phosphaté, de nature très cristalline et à structure fibreuse, emprisonne des grains entièrement amorphes. C'est là un témoignage décisif à ajouter à d'autres en faveur de l'existence d'une double génération de phosphate. Mais l'argument par excellence pour différencier les produits du second temps est fourni par l'absence constante de la plus petite trace d'inclusions organiques dans le ciment phosphaté.

Il n'est pas superflu de rappeler ici, que la fixation des hydrocarbures, toujours très rares dans la gangue, est exceptionnellement liée au développement du phosphate de chaux dans le ciment (II, p. 567).

Silice. — Le plus souvent absente, en tant que silice secondaire, cette substance est représentée dans la grande majorité des cas par de la *calcédonite* cryptocristalline, rappelant tous les caractères de celle des silex. Des phosphates ont tout ou partie de leur gangue, formée de calcédonite.

L'*opale* vient ensuite, reléguée à l'arrière-plan par rapport à la variété précédente. Combinée à la calcédonite, elle tend vers la forme de globules, toujours mal individualisés. Enfin, elle réalise dans la couche II de l'Oued Lausif (II, p. 458 et Pl. XXIII, fig. 70) un faciès nouveau, à l'état d'*opale* finement réticulée.

La *pseudocalcédonite* et la *quartzine* ont été observées une seule fois [«banc constant» du gisement de M'Zaïta, département de Constantine (II, p. 542)]. Quant au *quartz* microgrenu, il constitue la gangue d'un échantillon de phosphate du Tennessee (I, p. 53).

Dans toutes ses manières d'être, la silice secondaire a pris la place du carbonate de chaux, sans jamais se concentrer dans des vides. Sa genèse se réclame du processus générateur des silex. Les phosphates, tant soit peu silicifiés par leur gangue, revêtent une certaine fréquence dans l'Afrique du Nord, sans que la diffusion de la silice acquière un développement tel que leur valeur en soit sensiblement diminuée.

Pyrite de fer. — La pyrite est rarement autre chose qu'un élément accidentel dans les gangues. Par exception, elle y forme des mouchetures, des taches et, beaucoup plus rarement, elle prend une part importante à la constitution du ciment. Elle est développée au maximum dans un phosphate du Djebel-Sif (Tunisie), où elle joue, à elle seule, le rôle de gangue, mais par places seulement, et toujours en tant que produit épigénique de la calcite (II, p. 407). Elle peut figurer à dose massive dans la couche I du Djebel-Abdallah (Tunisie), où elle envahit ciment et restes organiques, en participant à la fossilisation des microorganismes (II, p. 503).

Fer hydroxydé. — C'est un produit secondaire, élaboré accidentellement dans les phosphates en grains, aux dépens de la glauconie. Il figure en proportion digne d'être mentionnée dans les phosphates maëstrichtiens du Djebel-Berda (Tunisie) particulièrement riches en glauconie (II, p. 445) et dans ceux du Sénonien de Baghari (II, p. 577). On sait qu'il intervient également dans la constitution des phosphates argileux de Kourigha. Ce ne sont là que ses principaux gisements.

Ce que j'ai dit plus haut de l'élaboration de l'hydroxyde de fer, consécutive de la formation de la glauconie (p. 849), peut intéresser la gangue dans une faible mesure.

Gypse. — L'analyse chimique nous enseigne que la diffusion du gypse est beaucoup plus grande que l'analyse micrographique le fait supposer. Il arrive fréquemment que plusieurs unités pour cent de sulfate de chaux échappent complètement au microscope, sans doute par suite de la destruction de ce minéral au cours de la confection des préparations. Cette diffusion s'observe plus particulièrement dans les phosphates du Sud tunisien et de l'Égypte. Lorsqu'il peut être identifié dans les phosphates de nos possessions nord-africaines, il existe sous forme de produit épigénique de la calcite. C'est alors une substance introduite secondairement dans le milieu, et morphologiquement indifférenciée. C'est le cas pour celui de la formation phosphatée du Bassin de Gafsa, comprise entre deux grands amas de gypse, dont l'horizon supérieur paraît être la source du sulfate de chaux disséminé dans le minerai sous-jacent.

Il en serait autrement pour le gypse des phosphates de Safâga (Égypte), caractérisé par un tel développement que je lui ai attribué une origine contemporaine de la sédimentation (II, p. 363).

GANGUE DES NODULES PHOSPHATÉS.

Le problème du ciment des phosphates en nodules est double. Il intéresse à la fois la gangue enveloppant les nodules et le ciment qui existe à l'intérieur même des rognons.

Lorsqu'un morceau de roche est converti en nodule-galet, il est phosphaté, dans la mesure où il est calcaire, et il l'est également par son ciment et, de surcroît, par ses organismes, s'il en renferme de calcaires. C'est la trame phosphatée résultant de cette minéralisation qui caractérise le nodule phosphaté, dans la presque totalité des cas.

Seul, le ciment qui enveloppe les nodules est le pendant de celui des grains. Par exemple, dans un nodule albien du Bassin de Paris, les sables verts de l'assise à *D. mamillare* et l'argile de l'assise à *Sch. inflata* jouent exactement le rôle du ciment calcaire des craies phosphatées sénoniennes, des phosphates de la Tunisie centrale et du Maroc, ainsi que le ciment marneux des phosphates du Sud tunisien. Ce parallélisme est loin d'entraîner une similitude dans les milieux générateurs.

Que des phosphates en nodules, tels que ceux du Culm des Pyrénées, aient pu prendre naissance en milieu franchement pélagique, c'est une exception dont le caractère singulier s'explique par le fait que les nodules en question réalisent le faciès de concrétions typiques. D'une façon générale, les phosphates en nodules relèvent des dépôts terrigènes, ce qui leur assure une très grande diversité de gangues, diversité absolument inconnue dans les phosphates en grains. Par voie de conséquence, ces nodules sont engagés dans des gangues qui sont, ou qui peuvent être, à elles seules, de véritables dépôts détritiques, réunissant quantité d'éléments, et des organismes relevant de multiples groupes. De là, résultent souvent pour les phosphates en nodules des caractères physiques, sujets à de nombreuses manières d'être, lesquelles sont loin d'être dépourvues d'importance pratique.

B. ÉTAT D'AGRÉGATION DES PHOSPHATES.

Il ne suffit pas d'analyser toutes les matières qui prennent part à la constitution du ciment des phosphates pour résoudre intégralement la question de l'état d'agrégation de ces roches sur le fond de la mer. D'un bassin à l'autre, il existe de grandes différences dans le degré de cohérence des minerais exploités. A ce point de vue, les phosphates du Centre de la Tunisie s'éloignent beaucoup des phosphates du Bassin de Gafsa, et dans l'étendue de celui-ci les dissemblances peuvent être très grandes. Bien plus, dans le domaine restreint correspondant à un siège de Kourigha, en suivant le développement de la couche exploitée, on passe brusquement, ainsi que nous l'avons appris, d'un phosphate meuble à un phosphate très solidement agrégé. De quand datent ces traits distinctifs de très grande importance au point de vue pratique?

Généralité des phénomènes de consolidation sous-marine en milieu phosphaté. -- Lorsque les grains des phosphates nord-africains ont été extraits de leur milieu générateur pour se concentrer en couches de puissance variable, ils étaient libres. La preuve en est qu'ils n'ont jamais été mis en place avec des incrustations trahissant l'existence d'un ciment dans le milieu générateur. A l'inverse, quand des fragments de phosphate ont été remaniés, au cours de la sédimentation phosphatée, ils étaient pourvus d'une gangue, et tout prouve que cette gangue communiquait au minerai une très grande

cohérence. Il est, en effet, de règle que les agents mécaniques, mis en œuvre pour fragmenter les phosphates sous la mer, n'ont jamais réussi à en dissocier les éléments constituants. Je rappelle, une dernière fois, que les grains phosphatés et les organismes, fussent-ils des restes de tissu osseux, ont été tronqués par les plans de fracture, et que les témoins sont restés solidement fixés dans les alvéoles en marge des complexes. De toute évidence, l'état d'agrégation des grains était plus qu'amorcé. Et vu les actions dynamiques sans cesse en jeu dans le milieu considéré, la notion d'une consolidation très avancée s'impose sans réserve. D'autre part, l'hypothèse que la cimentation des matériaux est susceptible de comporter de multiples temps n'est étayée par aucun fait d'observation.

Les phosphates en grains ne sont pas les seuls dépôts qui plaident en faveur d'une consolidation très développée sous la mer. De l'étude des calcaires qui leur sont associés, en tant que stériles, découle le même enseignement. Par exemple, ceux des « boulets » du Bassin de Gafsa, qui sont assimilables à de volumineux galets, témoignent d'un état d'agrégation également très avancé du calcaire subordonné à la formation phosphatée, lorsqu'ils ont été détachés de bancs calcaires, puis convertis en galets sous la mer. Ceux d'entre eux qui sont restés entiers, bien que perforés de tous côtés, après avoir été roulés et usés sur le fond de la mer, se réclament tout particulièrement d'une extrême cohérence.

Une conclusion analogue se dégage de la considération des nodules crayeux concentrés à la base de la craie phosphatée à *B. quadrata* du Bassin de Paris. Tous, sans exception, procèdent de la craie du mur de la formation. Ce sont, à proprement parler des galets de forme générale arrondie, souvent irrégulière, voire anguleuse, dont la surface n'est même pas toujours débarrassée des inégalités des plans de cassure. Parmi eux, il en est qui ont été entraînés sur de multiples fonds, avant leur mise en place définitive, ce que prouvent les perforations d'un même élément obturées par des produits différents (I, p. 225). En l'espèce, la cohérence des matériaux remaniés est la conséquence, soit d'une phosphatisation partielle, soit d'un commencement de cristallisation de la vase crayeuse.

Lorsque les stériles associés aux couches de phosphate sont de nature dolomitique, comme dans les gisements du Hodna, les mêmes constatations s'imposent, quant à la consolidation des matériaux remis en mouvement.

CONCLUSIONS.

Les enseignements dégagés de l'analyse des phosphates sédimentaires, en ce qui touche la question de la consolidation sous-marine des sédiments, concordent à merveille avec ceux que j'ai tirés de l'étude des roches siliceuses, calcaires et ferrugineuses.

En particulier, ils s'harmonisent, point par point, avec ceux qui découlent de l'étude des minerais de fer oolithique secondaires, lesquels réservent une grande place aux phénomènes de consolidation sous-marine⁽¹⁾. C'est en tablant sur la banalité de ces phénomènes que j'ai conclu à l'existence d'un « métamorphisme général sous-marin »⁽²⁾. Que la formule soit acceptée ou rejetée, il n'importe, dès l'instant que le fait existe.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les minerais de fer oolithique de France. II. Minerais de fer secondaires (*Et. Sites min. France*, 1922, p. 941).

⁽²⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 942.

Maintenant que nos connaissances en la matière s'étendent à presque tous les grands groupes de roches sédimentaires, on peut affirmer que *les phénomènes de consolidation sous-marine ont revêtu une extrême importance dans le passé.*

Faut-il en rattacher le mécanisme aux ruptures d'équilibre dont l'intervention est certaine dans tous les milieux, où les phénomènes de remaniement et de consolidation ont été observés en liaison avec elles? Autrement dit, leur intervention est-elle nécessaire pour qu'il y ait consolidation sous-marine? A vrai dire, je manque d'éléments pour me prononcer avec certitude. Il se peut que sans revêtir le caractère de nécessité absolue, l'influence des ruptures d'équilibre imprime aux phénomènes de consolidation une allure, rapide au point qu'elle suive de très près la chute des matériaux sur le fond de la mer. En toute solution, *les phénomènes de consolidation sous-marine sont de ceux qui dominent l'histoire de beaucoup de roches sédimentaires, postérieurement à la sédimentation.*

C. FACTEURS DE LA COLORATION DES PHOSPHATES EN GRAINS ET NODULES.

Vus en coupes minces, les grains phosphatés présentent une gamme de teintes, peu variées, mais suffisantes pour en diversifier la physionomie.

Il en est de très purs et d'incolores; d'autres, en très grand nombre, sont jaune paille de diverses nuances; beaucoup sont grisâtres, franchement gris ou gris plus ou moins foncé, avec cette particularité que le produit colorant peut être uniformément réparti ou non, et parfois ordonné concentriquement, ce qui entraîne maintes variantes dans l'aspect des matériaux. Enfin, ils sont teintés en brun, brun noirâtre et quelquefois verdâtres.

Ceci dit, notons que les matières colorantes qui teintent les grains phosphatés se réclament de plusieurs origines.

1° Il en est de nature minérale, comme la calcite, jouant le rôle de résidu, témoin de la composition première des éléments. A dose massive, la calcite, réduite en une véritable poussière de granulations trouble la limpidité des grains. Il n'en va pas de même lorsqu'elle est largement cristallisée ou convertie en rhomboèdres. On sait qu'elle est fort loin d'exister dans tous les grains.

2° Un grand nombre d'inclusions de nature organique représentent des témoins du microplankton, vivant en abondance dans certaines mers à phosphates. Il s'agit des *Diatomées*, *Foraminifères* et *Radiolaires*, sans parler des *Silicoflagellés* et de nombreux restes de microorganismes non identifiés, conservés dans les grains.

3° Des éléments, souvent très répandus, sont souillés par un résidu granuleux, élaboré aux dépens de matières organiques, répandues à profusion dans le milieu générateur des phosphates riches en microplankton. En moyenne, ces produits jouent un rôle prépondérant dans la coloration des grains.

4° Un autre composé, d'origine également organique, rentrant dans la catégorie des hydrocarbures gazeux et solides, influence profondément la teinte des éléments et des minerais dont il fait partie intégrante. C'est lui qui brunit les matériaux phosphatés à des degrés très différents et leur communique une odeur, dite bitumineuse, très prononcée.

5° Un groupe, représenté par un nombre infini de grains réunit des matériaux plus ou moins verdis par de la glauconie intimement associée au phosphate de chaux et de rares éléments à noyau glauconieux.

6° Toutes les inclusions dont il vient d'être question datent de l'origine même des grains. Il s'y ajoute parfois deux minéraux engendrés secondairement, la pyrite et l'hydroxyde de fer.

Du fait que les nodules-galets sont de véritables roches, subordonnées aux formations terrigènes et de composition très variée, leur teinte au microscope est profondément influencée par les minéraux et organismes qui participent à leur composition. La glauconie figure au tout premier rang parmi les inclusions minérales susceptibles d'en modifier la couleur.

2° DONNÉES CHIMIQUES.

Par suite de circonstances que je crois devoir rappeler, l'étude des données chimiques fournies par l'analyse des phosphates ne répond qu'incomplètement à mon dessein. En bonne logique, je ne pouvais l'aborder qu'une fois mes recherches terminées, c'est-à-dire au cours des dernières années qui viennent de s'écouler. Mis à la retraite par anticipation, avant l'achèvement de mes investigations, j'ai été privé des moyens de travail réunis dans mon laboratoire du Collège de France. De surcroît, en m'éloignant de Paris, la guerre m'a mis dans l'impossibilité de procéder à l'École des Mines à toutes les vérifications que j'avais en vue.

Dans le but de ne pas trop différer la publication du présent fascicule, lequel, finalement, pourrait bien ne jamais voir le jour, en raison de nos conditions d'existence très difficiles (et de la grande incertitude quant à l'avenir immédiat), j'ai pris la décision de mettre fin à mes recherches et de laisser à d'autres le soin de résoudre certaines questions d'importance, qui se sont posées d'elles-mêmes chemin faisant et que j'ai dû laisser de côté.

En conséquence, la présente étude sera limitée à quelques données relatives au carbonate de chaux, à la constitution du grain de phosphate et à la quantité du fluor et du chlore incorporés aux matériaux phosphatés.

Carbonate de chaux. — Le problème du carbonate de chaux inclus dans les éléments phosphatés est d'une portée fondamentale pour l'histoire des phosphates de chaux sédimentaires. Ainsi que je le rappellerai plus loin, nodules et grains sont phosphatés dans la mesure où ils ont été calcaires dès le principe, formule qui n'est pas rigoureusement vraie pour la totalité des grains, du fait que le phosphate de chaux prend également la place des microorganismes siliceux qui peuvent y figurer.

Nombreux sont les cas où les coupes minces des grains font ressortir l'existence — à l'état libre — et parfois en notable proportion, de témoins de carbonate de chaux généralement corrodés, qui ont échappé à la phosphatisation. Tantôt, ce calcaire résidu est assez développé pour solliciter l'attention au premier coup d'œil; tantôt, ses représentants, de taille très exigüe, ne sont perceptibles qu'à de forts grossissements. Le carbonate de chaux qui fait partie intégrante des formules données par mon ami A. Lacroix pour la staffelite et la colophanite (I, p. 3 et 4) est lui-même un témoin du calcaire mis à contribution pour engendrer les matériaux phosphatés.

Or, plusieurs de mes analyses globales accusent l'absence du carbonate de chaux, particularité qui doit être interprétée en faveur de l'existence dans certains de mes échantillons d'un *phosphate de chaux non carbonaté*. Cette première question méritait des recherches approfondies que je n'ai pu entreprendre.

Constitution intime de l'unité grain. — Cette constitution, qui fera plus loin l'objet d'une analyse très détaillée, est loin de nous avoir livré tous ses secrets. Les recherches qui lui ont été consacrées nous ont révélé l'existence de nombreuses variations de composition, principalement dues aux inclusions organiques qu'elle est susceptible de renfermer. Mais j'ai l'impression que l'édifice même du grain qui sert de support à ces inclusions ne nous est pas entièrement connu. Cette impression a sa source, notamment, dans l'analyse des phosphates durcis avec du baume de Canada pour les consolider, et soumis, soit à une cuisson très prolongée, soit à une température trop élevée. Il se fait alors des différenciations et des modifications de la matière, non explicables au pied-levé et qui restent à élucider. Tôt ou tard, on s'apercevra que cette question n'est pas négligeable du point de vue de l'enrichissement artificiel des phosphates. Un fait d'observation qui m'a été communiqué, sans que j'en puisse faire état ici, me confirme dans cette opinion.

Bref, le sujet n'est pas épuisé, ne fût-ce qu'à ce point de vue.

Fluor et chlore des matériaux phosphatés. — Parmi les enseignements qui ressortent de la comparaison des analyses, ceux qui intéressent le fluor et le chlore, assimilés par les éléments phosphatés, se dégagent en toute clarté :

- 1° L'âge des phosphates sédimentaires paraît sans influence sur les teneurs en fluor et chlore.
- 2° Les proportions respectives de fluor et de chlore sont loin d'être constantes.
- 3° De même, le pourcentage total de fluor et de chlore, comparé à celui de l'acide phosphorique est très variable, ce qui confirme la non-fixité des formules assignées à la dohlite et à la colophanite.

Aucune des données réunies en la matière n'est favorable à l'opinion que les éléments phosphatés s'enrichissent avec le temps en fluor et chlore, et que leur teneur en ces matières est fonction de leur âge.

A première vue, l'étude des réactions qui interviennent dans l'extraction et la concentration de l'acide phosphorique de l'eau de mer pour donner naissance à des gisements serait à sa place ici. Mais par raison de méthode et en attendant que soient réunis tous les éléments du problème, il est préférable, me semble-t-il, d'en différer l'examen.

3° DONNÉES GÉOLOGIQUES.

CARACTÈRES DES GISEMENTS DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

Qu'ils soient subordonnés à des dépôts terrigènes ou à des sédiments pélagiques, les gisements qu'il m'a été permis d'étudier sur place revêtent dans leurs caractères stratigraphiques un air de famille extrêmement prononcé.

On peut dire qu'à ce point de vue la craie phosphatée du Bassin de Paris synthétise les données essentielles résultant de l'étude des phosphates en grains. La formation débute invariablement par une modification profonde du substratum, lequel est *raviné, durci et perforé*, et par la genèse d'un dépôt grossier se réclamant des *brèches et conglomérats* dont les matériaux, sans exception, sont empruntés à la craie. A cet épisode initial fait suite une sédimentation grossière, génératrice de craies bourrées de grains de phosphate, et le retour à la sédimentation normale s'opère par la raréfaction lente ou rapide des éléments phosphatés. Telle est la marche des événements dans le cas normal, ou si l'on veut dans le cas de beaucoup le plus répandu. Mais il arrive qu'elle comporte des récurrences, entraînant la multiplication des horizons phosphatés.

Dès que l'on sort du domaine des craies phosphatées de l'Europe occidentale, ce qui est l'exception pour la craie phosphatée campanienne du Bassin de Paris, devient une règle pour les phosphates en grains, c'est-à-dire que la formation phosphatée se décompose en une série de couches phosphatées, alternant avec des dépôts stériles, tels que calcaires, marnes, etc.

A ma connaissance, la plus ancienne manifestation de cette manière d'être des phosphates en grains s'observe dans le Permien des Montagnes Rocheuses. D'après G.-R. Mansfield ⁽¹⁾, on peut compter dans l'Idaho, où sont accumulées les plus grandes épaisseurs de phosphate permien, environ 35 mètres de phosphate, se décomposant en horizons, répartis sur 46 mètres.

Les phosphates sénoniens des États du Levant sous mandat, puis d'Égypte, et surtout les formations phosphatées de Tunisie, d'Algérie et du Maroc, offrent tous des exemples de récurrences, maintes fois répétées. Rappellerai-je à ce sujet que L. Pervinquière a publié, en 1903, une coupe levée par P. Jordan, en Tunisie (II, p. 381), figurant *seize* horizons phosphatés, subordonnés à un complexe de puissance d'environ *onze* mètres.

L'image qui se dégage d'une pareille constitution trahit, à elle seule, l'existence d'une grande instabilité du milieu générateur. Un tel enseignement se trouve corroboré par la répétition des phénomènes qui ont présumé au dépôt de la craie phosphatée du Bassin de Paris. D'ordinaire, les couches phosphatées les plus puissantes d'un complexe donné, et parfois des bancs de puissance réduite, reposent sur des murs, modifiés sous l'influence d'une perturbation d'envergure. Le moment n'est pas encore venu de tirer toutes les conséquences de cette caractéristique essentielle des phosphates en grains.

A priori, il paraît logique de supposer que le milieu générateur des phosphates en nodules-galets doit être particulièrement favorable à cette répétition des horizons phosphatés, du fait qu'il témoigne, par toute une série de caractères, d'une activité dynamique plus grande que celle qui intervient dans la formation des phosphates en grains, et que, pour tout dire, il relève des sédiments terrigènes. Il n'en est rien. Pour des raisons inconnues, ce qui est une règle pour ceux-ci, fait exception pour ceux-là, c'est-à-dire pour les phosphates subordonnés aux dépôts terrigènes.

Sans pouvoir affirmer qu'il en est toujours ainsi, parce que je suis loin d'avoir visité tous les gisements de nodules dont j'ai parlé, il ne fait pas de doute que des perturbations profondes ont

⁽¹⁾ G. R. MANSFIELD. — Phosphate in the United States [Les Réserves mondiales en phosphate] (*XIV^e Congr. géol. int. Espagne*, 1926 [1928], t. II, Dépôts permien).

marqué le début des gisements d'importance. Quant aux rognons épars dans une formation faiblement phosphatée — telle que la craie glauconieuse cénomaniennne du Boulonnais — leur gènèse n'implique jamais, que je sache, l'intervention d'un grand trouble dans la sédimentation.

Conglomérats phosphatés. — Sous ce nom, je désigne, soit un produit composé d'éléments arrondis, à faciès de galets, soit un dépôt de nature bréchoïde, soit une formation de constitution mixte, réunissant en toutes proportions, des galets proprement dits et des éléments anguleux.

Au nombre des données géologiques à rappeler ici, il convient de signaler la fréquence des conglomérats subordonnés aux couches de phosphates en grains, dont ils occupent la base quand ils ne forment pas, à eux seuls, tout un horizon phosphaté. Au cours de notre étude, nous avons appris que les nodules-galets jouent un rôle de premier plan dans la constitution des gisements palzoéoiques et surtout mésozoïques, et qu'en particulier les lits de nodules de l'Infracrétacé du Bassin de Paris doivent être interprétés comme des conglomérats.

A cette catégorie de dépôts, je crois devoir rattacher des *poudingues de coprolithes* (II, p. 412). Les coprolithes des phosphates du Nord de l'Afrique sont loin d'être répartis uniformément. Il arrive qu'ils fassent défaut, et qu'à l'opposé ils soient concentrés, en très grand nombre, par une préparation mécanique poussée très loin. Il en résulte alors la formation de dépôts grossiers, à faciès de poudingues, coïncidant d'ailleurs avec le début d'une couche.

Laissant provisoirement de côté l'étude des conglomérats phosphatés qui inaugurent le dépôt d'une couche de phosphate en grains, au point de vue de la conception du milieu générateur, notons quelques particularités relatives aux incrustations des nodules et modifications subies par les murs des phosphates en grains.

Incrustations des nodules phosphatés. — Elles mettent en cause deux processus distincts :

1° Des nodules-galets sont revêtus d'incrustations rocheuses, témoins des sédiments dont ils ont fait partie intégrante, avant leur mise en place définitive (I, p. 152);

2° Les incrustations, de nature organique, fixées sur les rognons, au fond de la mer, font leur apparition à une époque tardive. Pour ma part, je n'en ai pas observé une seule, à la surface des nodules phosphatés, jusqu'à l'Infracrétacé compris. A ma connaissance, les plus anciennes remontent au Turonien. Par leur distribution, toutes démontrent que les nodules sont libres sur le fond, de telle sorte que les organismes incrustants en peuvent recouvrir la surface entière. Sont-ils perforés, il arrive que les organismes en recouvrent toutes les perforations. C'est le cas pour de nombreux nodules des craies phosphatées du Nord de la France.

Modifications subies par les murs des phosphates en grains. — Les rapports des couches de phosphates en grains de quelque importance, avec leur substratum, fournissent matière à d'intéressantes observations. Dans tous les gisements visités, ces rapports impliquent une solution de continuité et des modifications du mur, de nature variée. Si l'on s'en tient au schéma général, lequel est susceptible de simplification, dans certains domaines, ces modifications consistent en trois opérations principales : *ravinement*, *durcissement* et *perforations des murs*.

Ravinement des murs. — Le phénomène peut entraîner l'élaboration de produits remaniés, inclus à la base de la couche phosphatée, et la discontinuité du mur primitif, lorsque celui-ci

est réduit à l'épaisseur d'un simple banc. Les nombreuses coupes qu'on pouvait observer dans le Bassin de Paris, à l'époque de l'exploitation de la craie à Bélemnitelles, étaient toutes conformes à ce schéma.

Durcissement des murs. — Le durcissement ne peut être mis en évidence de façon indubitable que pour les complexes phosphatés, subordonnés à des formations de faible ou de moyenne consistance, comme c'est le cas pour la craie. Les exemples réalisant ces conditions sont assez nombreux pour affirmer que ce durcissement est tout autre chose qu'un phénomène exceptionnel. Ces murs durcis sont étroitement apparentés aux *bancs-limites* d'Hébert, et comme eux, ils, témoignent de modifications lithologiques sous-marines. Ce ne sont pas, et à beaucoup près les seules modifications à invoquer en faveur de phénomènes de consolidation sous-marine, sur les fonds favorables à la formation des phosphates de chaux sédimentaires.

LES PERFORATIONS D'ORIGINE ORGANIQUE ET LES ENSEIGNEMENTS QUI EN DÉCOULENT AU POINT DE VUE DU MILIEU GÉNÉRATEUR DES GISEMENTS DE PHOSPHATES DE CHAUX.

La question des perforations d'origine organique revêt une importance de premier ordre pour l'intelligence du milieu générateur des gisements. Par malheur, il s'en faut de beaucoup que l'identification des organismes, qu'on n'observe pour ainsi dire jamais, soit toujours possible, et que les conditions bathymétriques du milieu où ils ont vécu, puissent être fixées en toute certitude, voire même approximativement. Dans ce domaine que d'inconnues ! Il n'en est pas moins utile de faire la somme des connaissances acquises, en ce qui concerne les fonds réservés à la sédimentation phosphatée.

Les perforations qui vont retenir longuement notre attention intéressent à la fois les nodules galets plus ou moins phosphatés et les murs des gisements.

PERFORATIONS DES NODULES ET LEUR REMPLISSAGE.

Les plus anciens témoignages que j'ai recueillis en faveur de l'existence d'organismes perforants en milieu phosphaté, ne remontent pas au delà du Lias (I, p. 108). Mais il se peut que ceux-ci aient manifesté leur activité à une époque plus reculée, hypothèse que justifie l'intervention d'une multitude de restes d'Eponges, dès le Silurien (I., p. 27, 35 et 36).

De nombreux gisements de rognons phosphatés, d'âge plus récent que le Lias, n'ont enregistré aucune trace de leur action. Il en est ainsi, notamment, pour ceux de l'Albien du Bassin de Paris. A dater du Turonien et surtout du Sénonien, les traces en sont fréquentes.

Au temps de l'exploitation des craies phosphatées, on pouvait recueillir des rognons perforés, en nombre pour ainsi dire illimité. Malheureusement, presque tous les gisements étaient épuisés,

lorsque j'ai entrevu tout l'intérêt qui s'attache aux perforations des nodules. Pour éviter toute ambiguïté, notons que les nodules en question ne dérivent jamais de roches perforées, converties en rognons, et que toutes les perforations dont il va être question leur appartiennent en propre. Ce sont, tantôt et le plus souvent, des perforations tubulées, susceptibles de pénétrer jusqu'au cœur même des échantillons, tantôt de toutes petites perforations superficielles, paraissant se rapporter en totalité à des Eponges. Nombreux étaient les rognons qui s'en montraient criblés.

J'estime qu'il y a lieu de rappeler ici les principales manières d'être, réalisées par le remplissage de ces perforations dans les nodules concentrés à la base d'une seule et même craie phosphatée de l'Aisne (I, p. 222 et 226). Une très brève mention suffit pour rappeler à quel point leur analyse est instructive, quant au régime des mers génératrices des phosphates. Tous les cas observés peuvent être ramenés à trois principaux :

- 1° Le produit de remplissage est en tous points pareil à la roche du nodule;
- 2° Il en est distinct, et il en peut différer à bien des titres, preuve que les nodules ont été remaniés et leurs perforations oblitérées après remaniement;
- 3° Les perforations de certains rognons ont été remplies par des produits différents. De tels nodules ont été perforés à plusieurs reprises, et ils ont gagné leur emplacement définitif par étapes successives, correspondant à des fonds et à des sédiments de nature variée. A chaque type de remplissage doit correspondre un temps de perforation, car si toutes les perforations d'un nodule donné dataient de la même époque, leur remplissage par des produits variés serait absolument inexplicable.

Rien n'est plus certain que «les produits de remplissage de ces perforations sont susceptibles de varier beaucoup en des points très voisins, dans un seul et même nodule, voire dans l'étendue restreinte d'une coupe mince» (I., p. 222).

La conclusion qui s'impose à la suite de ce bref rappel, c'est que *le problème du remplissage des perforations et de ses multiples façons d'être est un sujet de toute première importance, pour l'étude des fonds générateurs des matériaux phosphatés*. Je ne crois pas exagérer en ajoutant que ce problème intéresse également d'autres milieux et qu'il revêt à proprement parler, une importance générale.

En passant, je souligne son analogie avec celui du remplissage d'Ammonites dont les chambres sont occupées par un sédiment tout différent du dépôt qui les renferme⁽¹⁾. Jusqu'à présent les géologues sont loin d'avoir prêté une attention suffisante à ce genre d'observations, en quoi ils se sont privés d'une source d'informations que je tiens pour des plus instructives.

Bref, je crois être fondé à poser en principe que tout sédiment qui remplit d'anciens vides — cavités organiques ou perforations — est à examiner de très près, parce qu'il peut témoigner de remises en mouvement insoupçonnées, et, partant, contribuer à éclairer les conditions du milieu générateur des sédiments à l'étude. De toute évidence, ce domaine de la lithologie des dépôts sédimentaires est loin d'avoir retenu l'attention des chercheurs autant qu'il le mérite.

(1) L. CAYEUX. — Les minerais de fer aolithique de France. Minerais de fer secondaires (Études gîtes min. France).

PERFORATIONS DES MURS DES COUCHES DE PHOSPHATES EN GRAINS.
ORIGINE DES «BOUDINS PHOSPHATÉS».

Il n'est nullement exagéré d'affirmer, au début de cette étude, que la solution du problème des perforations qui entament le mur des phosphates en grains est appelée à projeter une vive lumière sur la bathymétrie des mers à phosphates, c'est-à-dire sur l'une des conditions essentielles du milieu où les courants ont rassemblé les grains.

De ces perforations, il en est de toutes petites et superficielles qui se réclament des *Spongiaires*. Pour le moment, il est impossible d'en tirer le moindre parti. Il en existe de grande taille qui, par leurs faciès et leurs dimensions, rappellent celles des *Pholades*. Les dernières ont attaqué certains galets calcaires des phosphates du Sud tunisien, au point de ne rien laisser subsister de leur surface originelle. *Tels de ces galets de forme aplatie ont leurs perforations remplies de produits, distincts sur les deux faces.*

Nombre de fois, j'ai signalé dans les gisements de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc, au mur des couches de minerai, des sortes de «cordons phosphatés», jouant le rôle de perforations. Chemin faisant, j'ai envisagé maintes hypothèses, en ce qui les concerne, sans d'ailleurs pouvoir me prononcer. La terminologie, dont je me suis servi pour les désigner, ne reflète que trop mon indécision. Je les ai comparés à des *Chondrites* et à des *rhizomes*, avec lesquels ils ne manquent pas d'affinités. Et finalement, pour ne préjuger d'aucune assimilation, je les ai baptisés sous le nom de *boudins phosphatés*. Quelle que soit la solution appelée à prévaloir, il est certain que par rapport aux murs des horizons phosphatés, ces boudins font l'office de *perforations*.

Les boudins phosphatés abondent principalement dans les gisements de l'Est algérien et de la Tunisie. N'étaient les phosphates à Globigérines de Boghari (II, p. 577) qu'en l'état de nos connaissances, ils appartiendraient en propre aux phosphates à Diatomées, dont ils fournissent d'ailleurs une des principales caractéristiques. Il se peut que leur extension géographique ne soit limitée au Nord africain que provisoirement, du fait qu'ils ont pu ne pas retenir l'attention des observateurs en d'autres régions.

A très peu d'exceptions près, ces boudins phosphatés entament exclusivement le mur des couches les plus puissantes. Quelques exemples permettent d'en constater la présence au toit.

Allure générale. Morphologie et dimensions. — En règle générale, ces cordons phosphatés sont particulièrement accessibles aux investigations dans les galeries, où le hasard les fait apparaître à la couronne, dans l'épaisseur du mur d'une couche surmontant le phosphate en exploitation. C'est alors qu'on peut juger de leur développement dans le sens horizontal.

Ces mêmes boudins, vus en coupe verticale dans l'épaisseur des murs, fournissent des données qui complètent très heureusement les caractères observés à la couronne des galeries. Nulle part, les conditions d'observation ne sont plus favorables qu'à M'Zaïta (Constantine), à l'entrée du travers : banc Largillier⁽¹⁾, où l'érosion atmosphérique, en débarrassant de leur gangue les cordons phosphatés, les a dégagés, comme dans une préparation anatomique des plus réussies (Pl. XXX, fig. 97).

(1) Un gros bloc qui en a été détaché se trouve provisoirement dans les collections du Collège de France.

Qu'on se figure des sortes de boudins partant de la base même du phosphate, et s'enfonçant dans la mer comme des racines, généralement nombreux au départ, au point d'être pressés les uns contre les autres et de s'entremêler, en ne laissant du calcaire ou de la marne du mur que d'insignifiants témoins, lorsqu'ils réalisent leur maximum de fréquence. A une distance variable de la couche phosphatée, les uns s'arrêtent et les autres descendent jusqu'à des profondeurs atteignant tout au plus quelques dizaines de centimètres, dans le cas général. Par exception, la zone envahie mesure 0 m. 80 d'épaisseur dans le mur calcaire d'un phosphate de l'Oued Lousif (t. II, p. 451). Ces boudins s'engagent dans le mur, suivant les directions les plus diverses, verticales, obliques et horizontales. Des boudins, d'allure horizontale, ont pu être suivis sur 1 mètre de longueur⁽¹⁾. Cette direction se révèle extrêmement fréquente dans tous les cas; où l'on peut observer les boudins phosphatés en couronne sur de grands espaces.

Autant qu'il est possible de se faire une idée précise de leur allure, ces boudins phosphatés sont rectilignes, arqués, irréguliers et, par exception, développés en traits brisés. Leur section transversale est circulaire, subcirculaire, elliptique, ou irrégulière peut-être sous l'influence des déformations provoquées par la pression. Cylindriques, les boudins mesurent le plus souvent 2 centim. 5 à 3 centimètres de diamètre. Il en existe de plus petits et de plus gros. Dans le cas des sections elliptiques, les axes des coupes varient souvent du simple au double. Ces dimensions sont loin d'être constantes d'un bout à l'autre d'un même boudin, ce que montrent des coupes longitudinales variant fréquemment de largeur; il en est même qui accusent d'importants épaississements se traduisant par des sections en long très irrégulières, et de largeur susceptible de varier beaucoup en des points très rapprochés. Fait important, ces boudins ne s'effilent nullement à mesure qu'ils s'éloignent de l'horizon phosphaté, et tous se terminent en doigts de gant. Règle absolue, ils sont parfaitement individualisés dans tous les milieux où ils pénètrent.

De ces cordons phosphatés, ajoutons qu'il en est de nombreux qui se *bifurquent*, sous les angles les plus divers, et que certains d'entre eux donnent naissance à des sortes de *nœuds*, d'où partent de multiples cordons phosphatés. Un des échantillons prélevés en comporte quatre, situés dans le même plan, du moins au départ, le renflement correspondant au point de croisement, atteignant près de 0 m. 10 d'épanouissement. D'un autre partent cinq boudins différents.

Ornementation superficielle des boudins phosphatés. — Pour compléter l'image de ces curieux matériaux, ajoutons que la plupart des boudins sont pourvus d'une ornementation superficielle, qui est loin d'être nette. Elle consiste, généralement, en une série de toutes petites cavités, qu'on peut être tenté d'assimiler à des pores, sans pouvoir en fixer la nature exacte. Sur une même surface, ces pseudo-pores diffèrent ou non de diamètre, et mesurent par exemple, 1, 2 et 3 millimètres d'ouverture. La section en est irrégulière et la profondeur variable, mais toujours faible — moins de 1 millimètre. D'ordinaire, ils sont distribués sans ordre, auquel cas les boudins paraissent guillochés. Il arrive qu'ils trahissent une ordonnance longitudinale, plus ou moins nette, ou un aspect méandrique, résultant d'une fusion des petites cavités les unes dans les autres, ou encore l'existence de petites nervures, en saillie, de faible exclusion, relayées par d'autres, parfois convergentes, et susceptibles de se grouper dans toutes les orientations, défaut d'ordonnance, aboutissant à une ornementation très confuse. L'absence de toute différenciation à la

(1) Observation communiquée par la C^{ie} de Gafsa.

surface, plutôt fréquente, n'entraîne pas l'existence d'une surface lisse, en raison de la constitution grossière des boudins, qui est celle des phosphates dont ils dépendent. Cette structure grossière s'oppose évidemment à l'excellente conservation de la totalité des détails de la surface. A toutes les traces qui viennent d'être mentionnées, s'ajoutaient de loin en loin, des cavités irrégulières plus grandes, évoquant l'idée de cicatrices laissées par des appendices détruits.

Faut-il voir dans l'ornementation en question les restes d'une différenciation superficielle, sans relation avec l'intérieur des boudins, ou, au contraire, les vestiges d'une organisation que la fossilisation a profondément altérée, il est impossible de se prononcer avant l'identification des boudins. Dans l'hypothèse de perforations dues à des Crustacés fouisseurs qui sera envisagée plus loin cette ornementation représenterait la contre-empreinte des inégalités de la surface des carapaces. Dans le même ordre d'idées, il est intéressant de noter que les coupes des boudins, examinées au microscope, ne diffèrent en rien de celle des phosphates, et que j'y ai vainement cherché des indices de structure organisée.

Nature des roches perforées. — D'une façon générale, les boudins phosphatés des gisements de la Tunisie centrale sont inclus dans les calcaires, et ceux de la Tunisie méridionale dans des marnes. Dans le Hodna (Constantine), ils s'enfoncent en milieu dolomitique.

Dans l'ignorance où nous sommes sur la nature des boudins phosphatés, la question de l'état physique originel des roches traversées revêt une grande importance, en ce sens qu'elle peut fournir des arguments contre telle ou telle solution, paraissant satisfaire aux conditions du problème posé.

Les murs marneux se prêtent à toutes les interprétations envisagées. Il n'en va pas de même pour les murs calcaires. Des matériaux remaniés, empruntés à ces murs plaident en faveur de la consolidation originelle de leurs roches-mères. Au surplus, il est des murs qui correspondent aux bancs durs, ou pour mieux dire aux *bancs-limites* d'Hébert. Leur durcissement résulte de la rupture d'équilibre qui change brusquement la nature des dépôts, et marque le début de la sédimentation phosphatée. Autrement dit, le mur a déjà acquis une certaine cohérence lorsque le phosphate s'y enracine par toute une série de prolongements, à faciès de rhizomes.

Quand les marnes du mur renferment des «boulets calcaires», comme c'est le cas dans le Bassin de Gafsa (II, p. 448), on peut constater que les boudins se comportent à leur égard de deux façons différentes : tantôt, on les voit ramper, pour ainsi dire, à la surface des boulets, tantôt y pénétrer à des profondeurs variables, ou même les traverser de part en part. Or, ces boulets ne sont pas autre chose que des *miches* engendrées *in situ*, ou de volumineux *galets*, façonnés aux dépens des calcaires, intercalés dans les marnes, et de nature identique aux miches. Dans les deux cas, et principalement dans celui des galets, on se trouve en présence de roches, plus ou moins consolidées dans la mer, lorsqu'elles ont été entraînées par les boudins phosphatés (II, p. 462-463).

Le gisement de Rebiba (Tunisie centrale) m'a fourni un gros silex mamelonné, aplati, mesurant 0 m. 15 de plus grand diamètre, montrant plusieurs boudins phosphatés engagés dans le nodule, au voisinage de la surface et libres d'un côté; un autre le traverse complètement (II, p. 394, H). L'échantillon doit être interprété, non comme un silex perforé par des boudins, mais comme une concrétion développée après perforation des calcaires à silex.

Hypothèses et objections. — Que sont au juste les boudins phosphatés? Dès mes premières observations en Tunisie, l'hypothèse *Chondrites* s'est imposée à mon attention. Puis, sans me rallier à aucune solution, faute d'arguments décisifs, j'ai envisagé toutes les interprétations possibles. Au fond, le problème à résoudre ne peut impliquer que la *substitution* d'un sédiment phosphaté à des organismes préexistants de nature végétale, ou la *concentration* de ce même sédiment dans des boyaux creusés par des animaux fouisseurs. En toute conjecture, le boudin phosphaté est un produit de remplissage de galeries, engendrées par des processus foncièrement différents.

1° Toute séduisante qu'elle soit, à première vue, l'hypothèse végétale, que les principaux caractères des boudins tendent à accréditer, soulève une difficulté, dont on ne saurait méconnaître la gravité. Elle pèche en ce que le mécanisme de la minéralisation des cordons végétaux demeure inintelligible. Qu'on ne l'oublie pas, les boudins phosphatés, qu'il s'agit d'expliquer, sont toujours individualisés dans la perfection, même lorsqu'ils sont en contact ou entrelacés. Or, la substitution du sédiment phosphaté à la matière végétale ne peut s'effectuer qu'après la destruction de celle-ci. Quel que soit l'état physique des mers, les vides qui en résultent sont condamnés à disparaître avant leur moulage par le phosphate, ne fût-ce que dans le cas où les *Chondrites* sont très rapprochés ou contigus. De toutes façons, la pénétration du sédiment phosphaté dans des vides, qui n'existent pas encore lorsque le phosphate commence à se déposer, est inexplicable du point de vue mécanique, en raison du grand développement des boudins et de leur extension dans le sens horizontal.

2° L'intervention d'animaux fouisseurs, sans fournir une explication satisfaisante en tous points, est loin de se heurter à un pareil obstacle pour expliquer le comblement des galeries. En l'espèce, le sable phosphaté, qu'entraînent des courants, s'engage dans les galeries en voie de creusement et en assure le moulage. Dans ces conditions, les boyaux qui cheminent côte à côte ou qui s'enchevêtrent, au lieu d'être voués à une destruction rapide et complète, sont assurés de garder leur individualité. Ils le sont d'autant plus, que les murs, ainsi que nous le savons déjà, ont, pour le moins, subi une ébauche de consolidation avant le début de la sédimentation phosphatée. En sorte que le complexe des boudins d'un mur donné est maintenu dans son intégralité par une véritable armature, constituée par tous les témoins du mur épargnés par le travail de perforation.

Telle est finalement l'orientation qu'impose l'étude des boudins phosphatés, faite à la lumière d'une documentation, recueillie sur place dans tous les gisements exploités ou non, de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc.

Les Crustacés fouisseurs de l'époque actuelle. — Quoique restreinte, la documentation en la matière est d'un grand intérêt. On connaît depuis longtemps une série de Crustacés fouisseurs, dont l'activité se traduit par la formation de galeries, comportant des bifurcations. Dans une note publiée, en 1937, Yves Milon⁽¹⁾ a appelé l'attention sur des recherches japonaises consacrées aux conditions de vie de ce curieux groupe de Crustacés. Deux auteurs, J. Haya Saka⁽²⁾ et S. Takahashi⁽³⁾, ont fourni à ce sujet une documentation instructive. Les notes écologiques du second

⁽¹⁾ Yves MILON. — Les galeries creusées par des Crabes dans les faluns miocènes du Limou (C.-du-N.) [*C. R. Séances Soc. Géol. et Min. de Bretagne*, 1937, p. 3-6].

⁽²⁾ I. HAYASAKA. — The Burrowing Activities of certain Crabes and their Geologic Significance (*Amer. Midland Naturalist*, vol. 16, 1935, n° 1, p. 100).

⁽³⁾ S. TAKAHASHI. — Ecological Notes on the Ocypodid Crabs (Ocypodidae) in Formosa, Jafran (*Annot. Zool. Jap.*, vol. XV, 1935, n° 1, p. 82-85).

sur les « terriers » des Crabes, du groupe des *Ocypodidae*, observés à Formose, mettent en évidence cinq types que différencie le dessin des perforations, les uns simples, les autres en forme de V ou de Y, ou de figure très compliquée comportant l'existence de toute une série de ramifications. Ces types se répartissent entre les genres *Ocypoda*, *Ylyoplax*, *Scopimera*, *Mictyris*, *Uca* et *Macrophthamus*. La profondeur de pénétration des terriers, qui est généralement faible, atteint jusqu'à 2 mètres (*Ocypoda cordimana*). La plus grande longueur attribuée aux « tunnels » est de 1 m. 20.

Traces fossiles de Crustacés fouisseurs. — A ma connaissance, la plus ancienne mention de ces traces est due à deux savants japonais, S. Nomura, et K. Hatou⁽¹⁾, et date de 1936.

Qualifiées de « concrétions » par les auteurs, elles sont constituées par un grès à grain fin, et gisent dans un sable grossier, attribué au Miocène supérieur ou au Pliocène. Les formes figurées ne sont pas sans analogie avec celles des boudins phosphatés. On y voit des concrétions en forme de Y; d'autres, incomplètes, figurent des traits brisés, reproduisant exactement l'image des boudins phosphatés, plusieurs fois bifurqués, amputés d'une branche sur deux à chaque bifurcation, etc. Le diamètre de ces moulages varie de 2 centim. 2 à 4 centimètres, en quoi ils sont comparables aux cordons phosphatés. J'ajoute que mes matériaux d'étude, principalement ceux que j'ai observés sur place, affectent une morphologie plus variée et qu'on y peut trouver tous les types rassemblés sur la planche occupée au travail de S. Nomura et K. Hatou.

De son côté, Y. Milon a rapporté à des traces de Crustacés fouisseurs, des « tubulures » qu'il a observées avec L. Dangeard dans les faluns vindoboniens du Quiou (Côtes-du-Nord)⁽²⁾. Il s'agit de tubes allongés, d'un diamètre variant de 1 à 2 centimètres, et de longueur ne dépassant pas 25 centimètres, « généralement courbes et parfois ramifiés » toujours privés de structure organisée reconnaissable. Tous leurs « caractères sont ceux d'un remplissage de cavités par un sédiment plus fin, qui a dû être assez rapidement aggloméré⁽³⁾ ». Toujours observées au contact de deux faluns, ces empreintes, d'après Y. Milon, « peuvent avoir une certaine relation avec le caractère transgressif de la formation supérieure (falun fin) ». Ce que l'on peut traduire en disant que leur développement coïncide dans le temps et dans l'espace avec une rupture d'équilibre de la mer.

CONCLUSIONS.

Si les observations qui viennent d'être signalées, et celles beaucoup plus nombreuses qui sont consignées dans le présent mémoire, n'entraînent pas de certitude absolue, quant à l'identité des boudins, il est permis, croyons-nous, d'affirmer que toutes les probabilités sont en faveur de leur attribution à des Crustacés fouisseurs.

(1) S. NOMURA and K. HATOU. — On the Occurrence of peculiar shaped Concretions probably due to perlain Decapod Crustaceans (*Japanese Journ. of Geol. and Geogr.*, vol. XIII, 1936, p. 57-61, pl. XI).

(2) Y. MILON et L. DANGEARD. — Notes d'excursions sur le bassin tertiaire du Quiou (Côtes-du-Nord) [*Bul. Soc. Géol. et Min. de Bretagne*, t. III, 1922, p. 320-328, pl. XVI].

(3) Y. MILON. — Les galeries creusées par des crabes dans les faluns miocènes du Quiou (Côtes-du-Nord) [*C. R. Séances Soc. Géol. et Min. de Bretagne*, 1937, p. 3-6].

A la vérité, le développement des boudins, à l'échelle indiquée, dans l'immense domaine correspondant à la Tunisie, à l'Algérie et au Maroc, nous met en présence d'un phénomène très difficile à concevoir dans sa généralité et son ampleur. Avec la notion des ruptures d'équilibre, qui en est inséparable, ce phénomène domine tout le problème bathymétrique des mers à phosphates de l'Afrique du Nord.

Maintes fois, j'ai envisagé les hypothèses possibles pour échapper à la conclusion qui paraissait s'imposer, tant l'enseignement qui en découle s'annonçait gros de conséquences. Et c'est finalement au diagnostic *perforations de Crustacés fouisseurs* que je m'arrête, sans la moindre hésitation. Je dois dire, à la vérité, que les précisions qui m'ont été fournies par plusieurs savants, qui font autorité en zoologie, se sont révélées très favorables à ma détermination.

Il ne m'échappe pas qu'on est fondé à me demander où sont les carapaces des Crustacés mis en cause. Par malheur, je n'en ai pas observé une seule; mais c'est peut-être parce que je ne les ai pas cherchées, l'attribution que j'ai faite des boudins phosphatés aux Crustacés fouisseurs étant très postérieure à mes investigations sur le terrain. Il n'est d'ailleurs pas impossible qu'elles aient disparu en totalité. On sait qu'il est de règle pour toutes les perforations des craies phosphatées de constater l'absence absolue de la moindre trace des organismes qui leur ont donné naissance. Le même sort a été réservé à tous les animaux auxquels se rapportent les nombreuses perforations, autres que les boudins phosphatés, dans les dépôts de l'Afrique du Nord.

L'orientation imprimée à mon diagnostic étant fixée, je crois devoir rappeler ici que l'existence des boudins phosphatés est synonyme de perturbation, car ils interviennent chaque fois qu'un trouble important se manifeste sur le fond des mers à phosphates. A cette rupture d'équilibre correspond toujours, une importante réduction de profondeur, prélude de l'arrivée des phosphates en grains, en grande masse. Jusqu'à présent, je suis resté constamment dans le vague sur la signification exacte des faibles profondeurs qui ont régné au cours de la sédimentation phosphatée. Il est maintenant possible de sortir d'une indécision qui n'a que trop duré. En bonne logique, je reprendrai l'étude de cet important sujet en fixant les conditions du milieu générateur des gisements de phosphates.

L'étude des formations phosphatées de l'Afrique du Nord a mis en évidence l'existence d'un lien indissoluble entre les perforations à faciès de boudins et les phosphates, à telle enseigne qu'il n'a pas été observé un seul boudin qui ne fût phosphaté. En réalité, la matière phosphatée ne joue aucun rôle dans cette association intime, et c'est uniquement le caractère grossier révélé à ses débuts par toute formation phosphatée importante, qui est en cause. En d'autres termes, ce caractère grossier correspond à des conditions bathymétriques favorables à la genèse des boudins phosphatés. En conséquence, il faut s'attendre à observer des boudins non phosphatés en des milieux autres que ceux qui engendrent des phosphates.

4° ORIGINE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE DE CHAUX.

D'un bout à l'autre de mes investigations j'ai enregistré des faits, sans jamais me préoccuper des contradictions apparentes ou réelles qui pourraient résulter de leur mise en œuvre définitive. Le moment est venu de les rassembler dans une étude synthétique, pour en tirer une vue aussi fidèle que possible du milieu générateur des phosphates sédimentaires, à l'époque de formation

de nos grands gisements nord-africains. L'enchaînement de toutes les circonstances dont ils sont le produit reste encore incertain sur plus d'un point important, par la raison que l'un des milieux, dont ils se réclament, a quelque chose de fugitif et d'insaisissable qui en trouble l'image, sans pour cela faire planer le moindre doute sur son existence.

Etudié à la lumière de tous les éléments d'information mis à la portée du chercheur, le problème de l'origine des gisements de phosphate de chaux se révèle d'une infinie complexité. Quelle que soit l'importance d'un gisement, sa genèse implique trois opérations principales, lesquelles interviennent et s'enchaînent dans un ordre constant.

A. *Diffusion et concentration de l'acide phosphorique en milieu marin.*

B. *Fixation du phosphate de chaux sous quatre formes principales : grains, nodules, organismes épigénisés et ciments.*

C. *Transport et concentration des matériaux phosphatés en des points d'élection, correspondant à nos bassins phosphatés; autrement dit formation des gisements.*

A. DIFFUSION ET CONCENTRATION DES PHOSPHATES DE CHAUX EN MILIEU MARIN.

De nos jours, l'acide phosphorique figure parmi les nombreuses substances en solution dans l'eau de mer. Au surplus, il prend une part variable, et souvent importante, à la formation du squelette des organismes, sans jamais faire complètement défaut dans leurs parties molles, par quoi il contribue dans une proportion généralement faible, en moyenne, mais nullement négligeable, à la constitution des sédiments en voie de dépôt. Cette double manière d'être, l'acide phosphorique la réalise tout au long des temps géologiques. Mais à certaines époques, d'élément accessoire ou rare qu'il est en régime normal, il devient essentiel, et c'est alors que les gisements de phosphate prennent naissance.

Au fond, notre étude nous met en présence de deux problèmes bien distincts, l'un, qui n'est autre que la diffusion de l'acide phosphorique, sous un double faciès, dans le milieu marin, et l'autre, la *concentration* de cet acide, sous l'influence d'agents, dont l'intervention affecte un caractère nettement épisodique. Avant d'en aborder l'étude pour les soumettre à une étude détaillée, il me paraît nécessaire de jeter un très rapide coup d'œil sur quelques-unes des hypothèses, émises dans le passé, pour expliquer l'origine première de l'acide phosphorique des sédiments.

Quelques conceptions sur l'origine première du phosphate de chaux des sédiments anciens. — Il est clair, pour qui étudie les concentrations de certaines substances dans la série sédimentaire, que le problème de leur origine a été mal posé pendant longtemps. C'est l'évidence même que, pour beaucoup d'auteurs, ce problème a été confondu avec celui de l'*origine première* des matières elles-mêmes, si bien que le *mécanisme de leur concentration* est resté dans l'ombre. Cela est vrai pour des substances banales, telles que la *silice*, le *fer* et le *phosphore*.

À la vérité, la première question, qui a capté toute l'attention des chercheurs, est loin d'avoir l'importance de la seconde. De surcroît, elle était généralement résolue d'avance, ainsi que je l'ai déjà noté en d'autres circonstances, par une seule et unique solution s'appliquant à toutes

les concentrations, en milieu sédimentaire, de produits qui ne mettent pas en cause des actions métamorphiques ⁽¹⁾.

Il fut un temps, où la notion d'origine interne s'imposait immédiatement à qui cherchait l'origine de certaines substances. On invoquait, tour à tour, des actions éruptives et l'intervention de sources thermo-minérales. Et quoique toute trace de communication avec la profondeur fit constamment défaut, on n'en restait pas moins fidèle à l'idée directrice préconçue.

En France, la théorie des sources a été appliquée, notamment, aux poches de phosphorites du Quercy et des sables phosphatés de la Picardie, etc. Il n'est pas exagéré de dire qu'il s'en est fallu de peu qu'elle ne régnât sans partage à un moment donné. Les progrès de l'exploitation dans les deux types de gisement, en démontrant que les poches en question, sans en excepter une seule, constituaient des entonnoirs fermés en profondeur, ont porté un coup mortel à cette conception. Personne, si je ne me trompe, ne songe plus aujourd'hui à faire appel à des sources, amenant des profondeurs de la terre l'acide phosphorique concentré dans les formations sédimentaires.

Après avoir fait une application abusive de la théorie des sources, on a cherché dans une toute autre orientation l'origine première de l'acide phosphorique. Pour ce faire, on eut l'idée de mettre à contribution des gisements de roches, plus ou moins chargés d'apatite, susceptibles de fournir l'acide phosphorique, nécessaire pour engendrer les belles concentrations de craies phosphatées qui venaient d'être découvertes dans le bassin anglo-parisien.

C'est ainsi que le chimiste H. Lasne ⁽²⁾, en 1890, supposait l'existence de courants, empruntant l'acide phosphorique aux formations cristallines du Massif Central, et traversant le Bassin de Paris pour gagner la région où s'élaboraient les craies phosphatées.

Munier-Chalmas ⁽³⁾ faisant sienne l'idée directrice de la conception de H. Lasne, écrivait en 1892 : « L'hypothèse que M. Lasne a faite, au sujet de la provenance et de la formation du phosphate de chaux de la Somme, me paraît probable. Il a admis que des cours d'eau, partant de continents anciens, dissolvaient sur leur parcours l'apatite des roches éruptives ou cristallophyllicennes et apportaient dans la mer sénonienne les éléments dissous de ce minéral *dans des proportions et dans des conditions telles* que le fluophosphate pouvait se reformer par simple précipitation chimique, l'intervention du phosphate accumulé par les Vertébrés n'étant pas nécessaire ⁽⁴⁾. »

Et Munier-Chalmas d'ajouter : « Quand on examine la disposition de la mer sénonienne à l'époque de la *Belemnitella mucronata*, on est conduit à penser que l'Écosse et surtout le grand continent scandinave ont été le point de départ du phosphore et du fluorure dissous. Les courants marins partant du Nord pour se diriger vers le Sud devaient, en arrivant dans les parties les moins profondes de la mer sénonienne du Bassin de Londres et du Bassin de Paris, se trouver dans des conditions de profondeur et de salure favorables à la précipitation des phosphates ⁽⁵⁾. »

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les concrétions phosphatées de l'Aghulas Bank, d'après le docteur K.W. Callet. Genèse des gisements de phosphate de chaux sédimentaires (B. S. G. Fr. 4 S. t. V 1905 p. 751).

⁽²⁾ H. LASNE. — Sur les terrains phosphatés des environs de Doullens (B. S. G. Fr., 3° S., t. XVIII, 1890, p. 486).

⁽³⁾ MUNIER-CHALMAS. — Origine des phosphates de chaux de la Somme et formation de la craie (B. S. G. Fr., 3° S., t. XX, 1892, C. R. Sommaire, pl. XLII-XLIX).

⁽⁴⁾ Allusion au rôle que J. MURAY et A. F. RENARD attribuent aux Vertébrés dans la formation des phosphates sédimentaires.

⁽⁵⁾ MUNIER-CHALMAS. — *Op. cit.*, pl. XLIX.

Que l'apatite des roches anciennes affleurant en bordure du Bassin de Paris ait été mise à contribution c'est possible, voire même très probable, mais le problème fondamental à résoudre, celui de la concentration de l'acide phosphorique en grande masse ne tire aucune lumière de l'explication.

A.J. Murray et A.-F. Renard revient le grand mérite d'avoir fait sortir la question de l'origine des phosphates du domaine des conjectures, où elle était restée trop longtemps confinée. Ainsi que nous l'apprenons plus loin, leur conception revient à faire jouer un rôle capital aux organismes dans l'élaboration de l'acide phosphorique. Et c'est également à leur intervention que plus tard, L. de Launay a recours pour expliquer la concentration.

De propos délibéré, je renonce à préluder à l'étude projetée par une revue bibliographique, même succincte, des innombrables travaux consacrés à l'histoire des phosphates sédimentaires, revue qui m'entraînerait à des développements qui ne faciliteraient en rien la recherche de la solution à proposer. Dans le même ordre d'idées, j'éliminerai des pages suivantes les théories qui se traduisent par de simples vues de l'esprit, pour ne retenir que les conceptions susceptibles de verser des faits d'observation à l'enquête qui s'engage. Ceci dit, abordons, sans plus tarder, l'étude des deux grandes questions dont la solution se confond avec celle du problème général en vue, c'est-à-dire la diffusion et la concentration de l'acide phosphorique dans la mer.

a. DIFFUSION DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE EN MILIEU MARIN.

Teneur en acide phosphorique de l'eau de mer.

La question de l'origine première du phosphate de chaux a réalisé un sérieux progrès le jour où l'importance de l'activité chimique des eaux continentales fut mise en pleine évidence. Dès 1887, nous apprenions par J. Murray⁽¹⁾ que les eaux douces transportent à la mer une moyenne de 182.000 tonnes de matières dissoutes par kilomètre cube d'eau, y compris 690 tonnes de phosphate de chaux. Ramenée à l'unité litre, cette masse de phosphate correspond à 0 milligr. 69.

Si l'on ne perd pas de vue que les organismes marins n'ont d'autre source de phosphore à mettre à contribution que l'apport des cours d'eau, et celui, d'importance incomparablement moindre qui résulte de la dégradation des côtes, on conçoit aisément que la proportion d'acide phosphorique susceptible de rester finalement dans l'eau de mer doive être infinie. Elle l'est, en effet. D'après Sir John Murray et Johann Hjort, la quantité de phosphore en solution dans l'eau de mer est comparable à celle de la silice⁽²⁾. Des déterminations faites par Raben, pour la Mer du Nord et la Baltique, font ressortir des variations saisonnières et des teneurs comprises entre 0,14 et 1,46⁽³⁾. Les investigations de Raben ont montré que la teneur en acide phosphorique

⁽¹⁾ J. MURRAY. — On the total annual Rainfall on the Land of the Globe, and the Relation of Rainfall to the annual Discharge of Rivers (*The Scottish Geographical Magazine*, vol. III, 1887, p. 65-77 [Abstract of Paper read before the Royal Society of Edinburgh, 17th January 1887]).

⁽²⁾ Sir John MURRAY and Dr. Joham HJORT. — The Depths of the Ocean, 1912, p. 185.

⁽³⁾ RABEN in Sir John MURRAY and Dr. Joham HJORT. — *Op. cit.*, p. 185.

se tient régulièrement au-dessous de 1 milligramme par litre⁽¹⁾. A ce sujet, Paul Portier⁽²⁾ rapporte qu'en hiver, au moment où la concentration en nitrates et phosphates atteint son maximum dans l'eau de mer, celle-ci renferme environ 30 à 40 milligrammes d'acide phosphorique par mètre cube. D'après le même auteur, une eau de mer de richesse moyenne, renferme un gramme de phosphore pour 100.000 litres d'eau. Si faible soit-elle, cette proportion d'acide phosphorique correspond à un tonnage total formidable, du fait que l'acide phosphorique est universellement répandu dans l'eau de mer. Encore convient-il de ne pas oublier que cet apport correspond à une période d'équilibre pour les continents et les océans, c'est-à-dire à un *minimum*. En temps de perturbation entraînant une plus grande activité des eaux douces, le contingent des matières dissoutes fourni à la mer — y compris le phosphate de chaux — doit augmenter dans de sérieuses proportions.

C'est dans l'afflux incessant de l'acide phosphorique, élaboré aux dépens de tous les dépôts continentaux qu'il faut chercher la grande source, et, pour tout dire, la source unique du phosphate de chaux, disséminé ou concentré sous quelque forme que ce soit dans les sédiments actuels et anciens. Le problème de l'origine première de l'acide phosphorique se trouve ainsi résolu sans faire appel à des phénomènes qu'on ne voit jamais à l'œuvre.

ACIDE PHOSPHORIQUE DES ORGANISMES.

L'étude systématique de la composition chimique du squelette des organismes vivants a révélé le fait capital que les Vertébrés sont loin d'avoir le monopole de la fixation du phosphate de chaux. Elle nous apprend, notamment, que trois groupes, les *Alcyonaires*, les *Crustacés* et les *Brachiopodes inarticulés* se signalent aujourd'hui par une teneur en phosphate de chaux, aberrante par rapport à celle des autres groupes, et parfois très élevée.

Un des plus intéressants à cet égard, est celui des *Alcyonaires*. F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler, à qui l'on doit une très précieuse documentation sur la constitution chimique du squelette des Invertébrés, ont constaté l'existence dans 22 *Alcyonaires*, depuis des traces jusqu'à 13,35 p. 100 de phosphate de chaux, matières organiques déduites. Des 22 analyses, 11 accusent plus de 1 p. 100 de phosphate de chaux⁽³⁾.

Les analyses réunies par O. Bütschli⁽⁴⁾ sur les *Crustacés* vivants montrent que la teneur en phosphate de chaux d'une trentaine d'individus s'élève jusqu'à 21,4 p. 100. Celles qui ont été données par F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler font ressortir l'existence de fortes proportions de phosphate de chaux dans les *Crustacés* Podophthalmes, tels que *Homarus*, *Pagurus*, etc. 17 essais ont donné depuis 6,57 jusqu'à 49,56 p. 100 de $\text{Ca}^3\text{P}^2\text{O}^5$ ⁽⁵⁾. D'autre part, 3 analyses de *Homarus*

⁽¹⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 368.

⁽²⁾ PAUL PORTIER. — Physiologie des animaux marins, 1938, p. 13.

⁽³⁾ F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — The inorganic Constituent of *Alcyonaria* (*Proc. Nat. Ac. of Sc.*, vol. I, 1915, p. 552-556).

⁽⁴⁾ O. BUTSCHLI. — Untersuchungen über organische Kalkgeleilde nebst Bemerkungen über organische Kieselgeilde (*Abhand. Ges. Wiss. Göttingen, Math.-phys. Classe*, N. F. Bd. VI, n° 3, tab. III).

⁽⁵⁾ F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — The inorganic constituent of marine Invertebrates (*Un. St. Geol. Surv., Prof. Paper*, 102, 1917, p. 41).

vulgaris fournies par Steiger, reproduites par F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler ⁽¹⁾ ont reconnu de 11,70 à 30,78 p. 100 de phosphate de chaux, avec variantes suivant les parties d'un même sujet analysées. Dans certaines régions de l'appareil tégumentaire des Langoustes (*Palinurus vulgaris*), j'ai observé que le phosphate de chaux peut se développer à grande échelle, à l'exclusion du carbonate de chaux.

Les recherches de F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler ont révélé le fait que 3 genres de Brachiopodes inarticulés (*Lingula*, *Discina* et *Glottidia*) sont phosphatés, au point que leur teneur en phosphate de chaux atteint 74,73 à 91,74 p. 100, matières organiques déduites ⁽²⁾.

Les autres groupes n'en renferment que peu ou point, mais la plupart en sont pourvus, ne fût-ce qu'à l'état de traces. F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler ⁽³⁾ nous ont encore appris qu'il existe de très faibles proportions de phosphate de chaux dans les Echinodermes. De leur étude, j'extrais les éléments du tableau suivant :

	Phosphate de chaux.	
Crinoïdes (21) ⁽¹⁾	Traces	1.11
Echinides (7).....	=	1.06
Stellérides (11).....	0.19	1.16
Ophiures (17).....	Traces	1.14
Holothuries (4).....	--	6.87

(1) Nombres d'espèces vivantes analysées.

En raison de la richesse numérique des représentants d'Echinodermes dans beaucoup de formations anciennes, ces chiffres sont loin d'être dénués d'intérêt.

Les analyses d'Éponges siliceuses, publiées par F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler, signalent l'absence d'acide phosphorique, ou son existence à l'état de traces et de faibles teneurs au maximum ⁽⁴⁾. Cette circonstance, jointe à la rareté des restes de Spongiaires, en moyenne, dans les phosphates étudiés, réserve à ce groupe un rôle insignifiant dans l'élaboration de l'acide phosphorique des gisements passés en revue ⁽⁵⁾.

(1) F. W. CLARKE and W. C. WHEELER, *op. cit.*, p. 46.

(2) F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — Composition of Brachiopode Shells (*Proc. Vat. Ac. Sc.*, vol. I, 1915, p. 262-266).

(3) F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — The inorganic Constituents of marine Invertebrates (*Un. Sl. Geol. Surv., Prof. Paper*, 102, 1917, p. 20-31).

(4) *Ibid.*, p. 7-9.

(5) L'analyse de quatre Éponges calcaires a fourni des teneurs de 3,55 et 9,96 p. 100 de phosphate de chaux pour deux d'entre elles, mais il se peut, d'après F. W. Clarke et W. C. Wheeler, que le phosphate soit à rapporter à la présence de petits Crustacés.

Cinq Brachiopodes calcaires analysés par F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler renferment soit des traces, soit des teneurs appréciables, ne dépassant pas 0,57 p. 100⁽¹⁾.

Sur neuf Bryozoaires, trois contiennent des traces, et six depuis 0,24 jusqu'à 2,68 p. 100⁽²⁾.

Les Crustacés, autres que ceux mentionnés plus haut, et les Mollusques ont des teneurs réduites à l'état de traces. Toutefois, il en est qui font exception. Tel est le cas pour des huîtres vivantes, provenant de régions différentes qui, analysées par A.-P. Tarner, ont donné de 0,011 à 0,075 p. 100 de phosphate de chaux⁽³⁾. Les tableaux dressés par A. Butschli signalent la proportion exceptionnelle de 1,20 p. 100 dans *Ostrea edulis*.

Le groupe des Algues calcaires, dont on sait la richesse dans maintes formations, réserve ou non une place au phosphate de chaux. Seize Mélobésiées analysées par F.-W. Clarke et W.-C. Wheeler accusent depuis des traces, ce qui est le cas pour onze types analysés, jusqu'à 0,43 p. 100⁽⁴⁾. Quatre *Halimeda* n'ont fourni que des traces. Par contre trois Mélobésiées, analysées par A. Damour, sont toutes phosphatées avec des teneurs atteignant au maximum 0,97 p. 100⁽⁵⁾.

Le rôle capital réservé aux Vertébrés dans la fixation du phosphate de chaux est trop connu pour qu'il soit nécessaire de le commenter ici. Ce rôle intéresse au premier chef les dépôts marins, et c'est généralement à ces organismes qu'on rapporte l'élaboration du phosphate de chaux, concentré dans les grands gisements d'origine sédimentaire. Nous verrons dans quelle mesure cette solution est conforme à la vérité. Bornons-nous à rappeler pour fixer les idées sur la teneur du tissu osseux en phosphate de chaux qu'à l'état sec, les ossements de Vertébrés renferment jusqu'à 60 p. 100 et davantage de phosphate de chaux; les dents en contiennent environ 70 p. 100 et leur émail 90 p. 100.

CONCLUSIONS.

Nous savons déjà par l'analyse des phosphates de chaux à *Obolus* d'Esthonie (I, p. 42, Pl. II, fig. 6) que de véritables gisements peuvent être engendrés par l'accumulation, en nombre incalculable, de valves de Brachiopodes inarticulés. De la présente étude nous pouvons conclure que des Invertébrés sont assez riches en phosphate de chaux, soit pour concourir à la formation de gisements, soit pour assurer à certains sédiments une teneur aberrante en cette matière. D'autres organismes, moins favorisés, mais de beaucoup les plus répandus, sont aptes à rendre tous les dépôts phosphoreux, ne fût-ce qu'à un degré infime. Encore ne faut-il pas oublier que la matière organique, qui n'est point exempte de phosphore, peut être, elle aussi, une source d'acide phos-

(1) F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — The composition of Brachiopods Shells (*Pr. Nat. Ac. Sc.*, vol. I, 1915, p. 262-286).

(2) F. W. CLARKE and W. C. WHEELER. — The inorganic Constituents of marine Invertebrates (*Un. St. Geol. Surv., Prof. Paper*, 102, 1917, p. 32).

(3) A. P. TARNER in A. DELESSE. — Lithologie des mers de France et des mers principales du globe (*Lithologie du fond des mers*, 1871, p. 271).

(4) F. W. CLARKE et W. C. WHEELER. — *Op. cit.*, p. 45.

(5) A. DAMOUR. — Note sur la composition des Millépores et de quelques Corallinées (*C. R. Ac. Sc.*, t. XXXII, 1851, p. 253-255.)

phorique pour les sédiments anciens en voie de dépôt. Nous sommes donc fondés à conclure que *l'acide phosphorique d'origine organique doit jouir d'une très large diffusion dans les dépôts sédimentaires anciens*. A peine avons-nous abordé l'étude des phosphates que cet enseignement était corroboré par des données décisives (I, p. 12-16).

b. CONCENTRATION DE L'ACIDE PHOSPHORIQUE EN MILIEU MARIN.

On sait que pour certains auteurs, la question de la formation des gisements de phosphates de chaux sédimentaires se confond avec celle de l'origine première de l'acide phosphorique, alors que le problème qui domine toute leur histoire peut être énoncé dans les termes généraux suivants :

Etant donné une substance que les eaux douces transportent à la mer en très minime proportion, quel est le mécanisme de sa concentration? Telle est la question que je vais essayer d'élucider, dans la mesure du possible, pour l'acide phosphorique en particulier.

Pour cela, il est nécessaire de rappeler au préalable les données dont nous sommes redevables à quelques observateurs. Tout ce que nous savons d'utile à ce sujet, nous le devons aux enseignements tirés de l'exploration des mers actuelles, et, avant tout, à la campagne du Challenger.

J'ai déjà noté qu'à J. Murray et A.-F. Renard, revient le grand mérite d'avoir posé, comme il convient, la question de l'origine des phosphates de chaux sédimentaires. Leur conception, exposée pour la première fois, en 1891, dans les Deep-Sea Deposits de la collection du Challenger, revient à dire, en termes très concis : *Ce sont les organismes marins, Vertébrés et Invertébrés, qui élaborent la totalité de l'acide phosphorique des gisements sédimentaires. Cet acide phosphorique est extrait de l'eau de mer, qui le reçoit des continents par l'intermédiaire des cours d'eau*. Tels sont, en extrême synthèse, les éléments principaux du cycle qui aboutit à la fixation dans les sédiments actuels de l'acide phosphorique, libéré en tout temps par les roches superficielles, qu'elles soient éruptives, métamorphiques ou sédimentaires. A cet enseignement qui remonte à un demi-siècle, on n'a rien ajouté d'essentiel jusqu'à présent. Voyons sur quelles observations il est fondé et dans quelle mesure il s'harmonise avec la constitution des phosphates de la série sédimentaire ancienne.

THÉORIE DE L'ORIGINE ORGANIQUE DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

Cette théorie a été exposée dans deux conceptions, l'une, relative aux phosphates des mers actuelles, et, l'autre, aux concentrations de phosphates au cours des temps géologiques.

Conception de J. Murray et A.-F. Renard. — Elle a son point de départ dans l'étude des concrétions draguées par le Challenger⁽¹⁾, et principalement de celles qui sont originaires de l'Agulhas Bank, au Sud du Cap de Bonne-Espérance. J'ai été amené à faire sur l'âge de ces dernières une réserve qui ne restreint en rien la valeur des observations relevées au point de vue envisagé⁽²⁾.

⁽¹⁾ J. MURRAY and A. F. RENARD. — Deep-Sea Deposits (*Rep. Sc. Results of the Voyage of H. M. S. Challenger*, 1891, Phosphatic Concretions, p. 391-400, pl. XX, fig. 1-4).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Interprétation des dépôts de phosphate de chaux dragués sur l'Agulhoes Bank, au Sud du Cap de Bonne-Espérance (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXCIV, 1932, p. 926).

Ibid., The phosphatic Nodules of the Agulhas Bank. (A Study of submarine Geology). (*Annals of the South African Museum*, vol. XXXI, 1934, Part 1, p. 105-136, pl. XXXII-XXXV).

L'idée maîtresse, développée par J. Murray et A.-F. Renard, est la suivante : Rien ne fait supposer que le phosphate des nodules dérive de sources sous-marines, ou qu'il procède directement de l'eau de mer. Tout l'acide phosphorique des nodules provient d'organismes marins, lesquels en contiennent à la fois dans leur squelette et dans leurs parties molles. Les dépôts auxquels ils sont incorporés, après leur mort, sont le siège de nombreuses réactions chimiques, sous la double influence de la décomposition de la matière organique et de l'eau de mer. De ce chef, résulte une vaste destruction d'organismes. « We know, écrivent les auteurs, that nearly all the bones of fishes, Crustacean carapaces, and other organic structures containing phosphates have been removed in solution ⁽¹⁾. »

Soumis à l'action de l'eau de mer chargée d'acide carbonique et de sels ammoniacaux, libérés par la destruction de la matière organique, le phosphate en solution dans l'eau de mer, est décomposé, puis l'acide phosphorique libéré en solution donne naissance à des phosphates ammoniacaux, lesquels réagissant sur le carbonate de chaux des coquilles, Coraux, etc., engendrent du phosphate de chaux.

A l'appui de la dernière réaction, J. Murray et A.-F. Renard invoquent une expérience d'Irvine et Anderson, montrant que dans l'espace de six mois, une variété poreuse de Corail avait extrait d'une solution de phosphate d'ammoniaque une quantité suffisante d'acide phosphorique pour remplacer environ 60 p. 100 du carbonate de chaux ⁽²⁾. Et les auteurs de conclure que le cycle du phosphate de chaux peut être caractérisé en disant qu'après avoir été concentré par des organismes, il est dissous par l'eau de mer, puis restitué au monde minéral à l'état concrétionné. C'est ainsi qu'il acquiert une forme plus stable en réserve pour les futurs besoins de la vie ⁽³⁾.

Ce phosphate de chaux, J. Murray et A.-F. Renard le supposent colloïdal comme la silice hydratée, et apte à se précipiter pour engendrer des concrétions. Pour cela, il suffit qu'un centre d'attraction déclenche un commencement de précipitation pour que le nucléus, une fois formé, se développe par additions successives.

Dans le cas des concrétions analysées le phosphate de chaux prend la place de tout ou partie de la gangue calcaire, remplit les loges des Foraminifères et finit par épigéniser leur coquille. Tout Foraminifère, dont les cavités sont oblitérées par du phosphate de chaux et la coquille pseudomorphosée devient un centre d'attraction suffisant pour donner naissance à une concrétion. Observons, en passant, que le processus mis en action donne naissance à des grains typiques, en même temps qu'à des nodules.

Quelques années plus tard, Sir John Murray et le Prof. E. Philippi ⁽⁴⁾, étudiant les matériaux dragués par l'expédition de la Valdivia sur l'Agulhas Bank, en 1898-1899, ont développé la même idée directrice. Le phosphate d'ammonium, engendré par l'action de l'ammonium, pro-

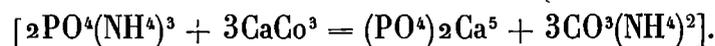
⁽¹⁾ J. MURRAY and A.-F. RENARD. — 3 *op. cit.*, p. 399.

⁽²⁾ IRVINE and ANDERSON. — On the Action of metallic (and other) Salts on Carbonate of Lime (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XVII, 1891, p. 52-54).

⁽³⁾ G. MURRAY and A.-F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 400.

⁽⁴⁾ SIR JOHN MURRAY und Prof. E. PHILIPPI. — Die Grundproben der *Deutschen Tiefsee-Expedition 1898-1899*, Bol. X, p. 186, Taf. XVI-XXII (T 1-VII) und 2 Karten.

duit par la décomposition de la matière organique, sur le carbonate de chaux donne naissance à du phosphate de chaux et à du carbonate d'ammonium, conformément à la réaction suivante :



Conception de A.-F. Renard et J. Cornet. — L'année même de la publication des Deep-Sea Deposits, A.-F. Renard, le collaborateur de J. Murray, et son assistant, J. Cornet, ont étudié les craies phosphatées, à la lumière des faits mis en valeur par l'analyse des matériaux dragués par le Challenger⁽¹⁾. Bien que la solution adoptée par les deux auteurs ne diffère de la précédente par rien d'essentiel, je crois devoir rappeler quelques-unes des observations qui visent le nœud de la question. Le fait qu'elle est principalement tirée de l'examen des phosphates en grains justifie, à lui seul, cette analyse.

A.-F. Renard et J. Cornet préludent à leurs conclusions sur l'origine du phosphate de chaux en écartant l'hypothèse d'un apport direct de l'intérieur du globe par l'intermédiaire de sources ou d'émanations internes, et celle d'un « dépôt de l'eau de mer sans l'intervention préalable des organismes qui sécrètent le phosphate »⁽²⁾.

Dans leur conception, ce sont lesdits organismes « dont la décomposition doit être envisagée comme la source *immédiate* du phosphate des concrétions. Ces débris d'êtres organisés et les produits phosphatés qui, sous la forme d'excréments, de tissus décomposés, viennent se mêler aux matières sédimentaires, subissent, longtemps même après le dépôt, les réactions chimiques qui s'accomplissent sous l'action de l'eau de mer ou des eaux infiltrées. Les matières phosphatées d'origine organique doivent, tout au moins au même titre, subir l'altération à laquelle n'échappent pas les substances auxquelles elles sont associées. En admettant, comme nous l'avons fait, que la matière phosphatée dissoute soit douée de la propriété des corps colloïdes, on comprend qu'elle soit faiblement retenue en solution et qu'il suffise qu'un centre de concrétionnement exerce son action pour la précipiter. Or, les observations de nos devanciers et celles que nous avons pu faire montrent que ce phosphate est attiré vers les substances organiques : de là, le fait que nous constatons si souvent, que la charpente du nodule est un Spongiaire, ou une coquille de Brachiopode; de là, l'enrichissement en phosphate, si fréquemment constaté dans les organismes fossiles dont les parties dures renferment ce corps. Ceci nous est encore prouvé par l'infiltration du phosphate de chaux à l'intérieur des Foraminifères et la pseudomorphose plus ou moins complète de leurs coquilles calcaires en phosphate⁽³⁾.

Cette interprétation, développée en étudiant la formation des nodules phosphatés de la craie, s'applique également aux grains de phosphate, isolés ou rassemblés en grand nombre dans la craie. Les auteurs admettent avec raison que leur concentration s'est opérée sous l'influence d'agents de transport. Quant à leur milieu générateur, il se trouvait à proximité des rivages, dans les eaux basses, où la vie se développe avec une « fécondité incomparable ». C'est là que les

⁽¹⁾ A.-F. RENARD et J. CORNET. — Recherches micrographiques sur la nature et l'origine des roches phosphatées (*Bull. Ac. roy. Belgique*, 3^e sér., t. XXI, n^o 2, 1891, p. 126-160, 1 pl.).

Ibid. — De la nature et de l'origine du phosphate de chaux des environs de Mons (*Ann. Soc. géol. Belgique*, t. XVIII, 1891, p. 3-13).

⁽²⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 152.

⁽³⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 152-153.

Poissons et les Reptiles « livraient par la décomposition de leurs tissus et de leur squelette, par leurs excréments, des matières phosphatées qui, dissoutes dans l'eau de mer et imprégnant la bouillie sédimentaire, devaient se concentrer, sous la forme de phosphate, dans l'intérieur des organismes microscopiques, comme nous le constatons dans les dépôts crayeux des mers actuelles »⁽¹⁾.

Cette dernière citation nous apprend que A.-F. Renard et J. Cornet considéraient les Poissons et les Reptiles comme la source du phosphate des gisements de la craie. Nous verrons bientôt si tel est l'enseignement qui s'impose.

Travaux divers. — Quand j'aurai mentionné une mise au point de l'état de la question, faite en 1908, par L.-W. Collet⁽²⁾, les quelques pages consacrées, en 1913, au mode de concentration des phosphates, en même temps qu'à l'intervention des êtres organisés dans la fixation de l'acide phosphorique par L. de Launay⁽³⁾, la vue d'ensemble publiée, en 1932, par W.-H. Twenhofel⁽⁴⁾, et une thèse formulée par G.-R. Mansfield⁽⁵⁾, en 1927, j'aurai indiqué les principales sources de renseignements à exploiter utilement en la matière.

Le dernier auteur qui a très largement contribué à la connaissance de la puissante formation phosphatée du Permien des Montagnes Rocheuses, a d'abord vu dans les oolithes phosphatées d'anciennes oolithes calcaires minéralisées par du phosphate de chaux, puis il s'est arrêté à la conception suivante : Les oolithes phosphatées, qui constituent une très forte proportion des couches phosphatées, ont été probablement formées directement par des agents biochimiques et physiques, aux dépens de solutions phosphatées colloïdes sur le fond de la mer⁽⁶⁾. Les circonstances qui se prêtent à la genèse des gisements et des grains sont réunies à la faveur des hypothèses suivantes : « Generally cool temperatures with some climatic oscillations prevailed during the time of deposition of the phosphate. These conditions tended to favor the growth of plant and animal life in the shallower waters, while at the same time they reduced the activities of the denitrifying bacteria, which curtail plant life and thus hinder the growth of animals dependent upon plants. Reduction of the activities of denitrifying bacteria may also have curtailed the precipitation of calcium carbonate, thus favoring the concentration of phosphatic solutions from which oolites might be formed. There was sufficient time for the postulated slow formation of the extensive phosphate deposits now founded »⁽⁷⁾.

Ma connaissance purement livresque des gisements en question et le très petit nombre d'échantillons soumis à mon examen ne me permettent pas de porter un jugement motivé sur la conception de G.-R. Mansfield. Je ne crois pas trahir la vérité en attribuant à celle-ci un caractère nettement conjectural, tout au moins dans l'un de ses éléments. J'en retiens tout particulièrement la

(1) A.-F. RENARD et J. CORNET, *op. cit.*, p. 156-157.

(2) L. W. COLLET. — Les concrétions phosphatées, et les dépôts marins, 1908, p. 194-213.

(3) L. DE LAUNAY. — Traité de Métallogénie, t. I, 1913, p. 646-649.

(4) W. H. TWENHOFEL. — Treatise on sedimentation, 2^e édit., 1932, Phosphatic Sediments, p. 546-562.

(5) G. R. MANSFIELD. — Prof. Paper 152 (*Un. St. Geol. Surv.*, 1927, p. 75-77, 187-188, 208-214 et 361-366). *Ibid.* — Phosphates in the United States. [Les réserves mondiales en phosphate (XIV^e Congr. géol. int. Espagne, 1926 (1928), t. II, Dépôts permien, p. 748-764).]

(6) G. R. MANSFIELD. — Prof. Paper 152, p. 366.

(7) R. MANSFIELD. — *Op. cit.*, p. 366.

notion de changements climatiques sujets à répétition pendant la période de dépôt des phosphates. Le fait serait du plus haut intérêt s'il était démontré que l'époque permienne a été témoin de pareilles variations, enregistrées par le dépôt des phosphates. Pour ce qui concerne les nombreux gisements d'âge divers que j'ai eu la bonne fortune d'étudier sur place, et à loisir, je puis dire que leur histoire n'a pas été influencée de façon sensible par des perturbations de nature thermique.

Pour conclure, je crois pouvoir affirmer que les innombrables contributions à l'étude du problème de l'origine des phosphates de chaux sédimentaires n'en fournissent, à elles toutes, qu'une solution partielle. Si je ne me trompe, l'essentiel reste à trouver, ce que je vais tenter immédiatement de démontrer.

MÉCANISME DE LA DESTRUCTION DE POISSONS A GRANDE ÉCHELLE, EN DES POINTS SINGULIERS DES OCÉANS ACTUELS.

Le rôle capital attribué aux restes de Vertébrés, dans la conception de J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet, soulève de grandes difficultés au point de vue de la concentration de leurs débris en quantité suffisante pour fournir la grande masse de matière première représentée par les gisements de phosphate en grains. Aussi est-il tout indiqué d'interroger les océans actuels dans l'espoir d'y trouver les éléments d'une solution adéquate à l'importance des gisements qu'il s'agit d'expliquer.

Trois exemples particulièrement instructifs ont été retenus pour illustrer le mécanisme de la destruction de poissons à grande échelle, en des points singuliers des mers actuelles.

1° En 1882, « durant les mois de mars et avril, rapporte L.-W. Collet, d'après J. Murray ⁽¹⁾, les vaisseaux arrivant à Philadelphie, Boston et New-York traversèrent, sur une longueur de 100 kilomètres, une région couverte de poissons morts ⁽²⁾. » « On estime, à la suite de la destruction des « tylefish », que le fond de la mer située entre le Cap May et Nantucket, fut recouvert d'une couche de poissons morts et d'autres organismes, d'une épaisseur de 1 m. 80 ⁽³⁾. » Une augmentation subite du courant froid du Labrador et son empiétement sur le Gulf-Stream seraient la cause de cette hécatombe, correspondant, d'après certaine estimation, à des centaines de millions de poissons. Notons, immédiatement, que le *Blake* et l'*Albatros* ont dragué de grosses concrétions phosphatées dans le détroit de Floride et dans la région où les « tyle-fish » furent détruits ⁽⁴⁾.

2° Une observation analogue intéresse la région de l'Agulhas Bank, située au Sud du Cap de Bonne-Espérance, à la rencontre d'un courant froid venant de l'Océan glacial antarctique et d'un courant chaud, arrivant de l'équateur par le détroit de Mozambique. C'est là, notamment, que le *Challenger* a recueilli dans ses filets à plankton des organismes morts ⁽⁵⁾.

⁽¹⁾ J. MURRAY. — Changes of temperature in the surface waters of the sea (*Geogr. Journ.*, vol. XII, 1898, p. 129-131).

⁽²⁾ L.-W. COLLET. — Les dépôts marins, 1908, p. 20.

⁽³⁾ *Ibid.* — *op. cit.*, p. 21.

⁽⁴⁾ *Ibid.* — *op. cit.*, p. 21-22.

L.-W. COLLET. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank (*Proc. Roy. Soc. Edinburgh*, vol. XXV, 1905, p. 865).

⁽⁵⁾ L.-W. COLLET. — Les dépôts marins, 1908, p. 19.

3° Dans ses « Leçons sur les gîtes de phosphate de chaux du Nord de la France », mon maître, J. Gosselet, a rappelé que, d'après Elisée Reclus, lors du changement de la mousson, principalement en octobre et en novembre, des milliards de poissons morts de toute espèce sont rejetés par la vague sur les côtes de Perim et d'Aden ⁽¹⁾.

Le même phénomène a été signalé par W.-T. Blanford sur la côte de Malabar à l'Ouest de l'Inde ⁽²⁾.

D'autres agents, tels que les éruptions sous-marines et les séismes, sont susceptibles de provoquer des hécatombes d'organismes marins et de poissons en particulier.

Reste à savoir dans quelle mesure ces faits d'observation peuvent éclairer la formation des gisements de phosphates. A mon sens, nous devons retenir avant tout que, sous des influences diverses, il se produit dans les conditions d'existence des organismes marins des ruptures d'équilibre, génératrices de concentrations de restes de Poissons d'importance exceptionnelle. Mais de toute évidence, l'ordre de grandeur des hécatombes provoquées est fort loin de correspondre à l'énorme accumulation des grains de phosphate d'un gisement donné.

CONNEXION ÉTROITE ENTRE L'EXISTENCE DES GISEMENTS DE PHOSPHATES DE CHAUX DU BASSIN DE PARIS ET LES RUPTURES D'ÉQUILIBRE DES MERS.

Ainsi que je l'ai rappelé en étudiant les craies phosphatées du Bassin de Paris (I, p. 247), j'ai dégagé de mes observations, en 1897, la loi suivante : « *Tous les gisements du Crétacé supérieur ont pris naissance aux périodes de rupture d'équilibre de la mer.* » Et j'ai ajouté : « *Il faudra, je crois, porter l'attention sur ce point, pour éclairer toutes les circonstances physiques et chimiques qui ont présidé à la genèse de ces gisements* ⁽³⁾. »

L'observation capitale que des concrétions phosphatées ont été draguées partout où se produisent de brusques écarts de température dans les eaux superficielles, par suite de la rencontre de courants chauds et de courants froids ⁽⁴⁾, m'a conduit, en 1905, à chercher un lien de causalité entre les ruptures d'équilibre des mers, résultant de transgressions et régressions et de la destruction en grand d'organismes, jugée nécessaire pour fournir et concentrer le phosphate des gisements ⁽⁵⁾. C'est alors que j'ai formulé la conclusion suivante : « *Les grandes ruptures d'équilibre*

⁽¹⁾ J. GOSSELET. — *Ann. Soc. Géol. Nord.*, t. XVI, 1888-1889 (1889), p. 43.

⁽²⁾ W. T. BLANFORD. — Discussion of paper by CORNET. On the phosphatic beds near Mons (*Q. J. G. Soc.*, vol. XXXII, 1886, p. 325-339).

⁽³⁾ L. CAYEUX. — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. Géol. Nord.*, t. IV, 2, 1897, p. 432).

⁽⁴⁾ J. MURRAY and A.-F. RENARD. — Deep sea deposits (*Rep. Sc. Results of the Voyage of H. M. S. Challenger*, 1891, Phosphatic Concretions, p. 396).

J. MURRAY. — Changes of temperature in the surface waters of the sea (*Geogr. Journ.*, vol. XII, 1898, p. 129-131).

⁽⁵⁾ L. CAYEUX. — Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank, d'après le D^r L. W. Collet. Genèse des phosphates de chaux sédimentaires (*B. S. G. Fr.*, 4^e sér., t. V, 1905, p. 750-753).

entraînent des changements de courants, de profondeur de la mer, etc.; bref, elles doivent jeter le trouble dans les conditions d'existence des organismes et déterminer la destruction d'innombrables individus.» Ainsi se trouve réalisée la condition *sine qua non* pour l'élaboration en grand du phosphate de chaux. L'enseignement final est que « les grands mouvements des mers seraient le point de départ de la formation de nombreux gisements de phosphate sédimentaire »⁽¹⁾. Nous apprendrons bientôt que cette conclusion appelle une retouche pour être applicable à la généralité des gisements de phosphate de chaux.

OBJECTIONS A LA THÉORIE DE L'ORIGINE ORGANIQUE DES PHOSPHATES DE CHAUX.

Pour éviter toute ambiguïté, notons qu'il s'agit de l'origine organique, telle qu'elle a été conçue dans les thèses passées en revue, et non de l'origine organique en général.

Quels sont, au juste, les organismes mis en cause pour élaborer l'énorme masse de phosphate concentrée dans les gisements? Tout bien considéré, la solution adoptée par J. Murray et A.-F. Renard, pour les phosphates de formation actuelle, et appliquée par A.-F. Renard et J. Cornet aux sédiments phosphatés des mers anciennes, est loin d'être adéquate à l'ampleur des phénomènes qu'il s'agit d'expliquer, et, mieux que cela, je la tiens pour entachée d'erreur dans son principe.

Rôle attribué aux Vertébrés. — Les extraits que j'ai donnés des publications de J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet nous enseignent qu'un rôle capital, et non exclusif, est dévolu aux Vertébrés dans l'élaboration du phosphate de chaux, finalement incorporé aux sédiments par leur intermédiaire.

En parlant de la formation des concrétions phosphatées dans les mers actuelles, J. Murray et A.-F. Renard écrivent « that nearly all the bones of fishes, crustacean carapaces, and other organic structures containing phosphates have been removed in solution »⁽²⁾.

« Pourquoi, écrit L.-W. Collet, en 1908,.... ne trouve-t-on pas des concrétions phosphatées dans les abîmes du Pacifique, où des os tympaniques et des dents de requins furent dragués en si grand nombre par le *Challenger*? A cette question nous répondrons que les os des animaux marins sont dissous avant d'atteindre le fond, et que le phosphate, résultant de cette action, entre en solution dans un volume d'eau considérable, tandis qu'il en est autrement dans les faibles profondeurs, où l'on rencontre généralement les concrétions phosphatées. Dans ces dernières localités, les corps des animaux marins, tués par les brusques changements de température de l'eau de surface, tombent sur le fond où ils se décomposent et où les os sont dissous, tandis que les parties plus résistantes, telles que les dents et les os tympaniques, restent sur le fond. »⁽³⁾

En conséquence, d'après J. Murray, A.-F. Renard et L.-W. Collet, le squelette des Vertébrés marins est largement mis à contribution par l'élaboration de l'acide phosphorique nécessaire à la formation des concrétions phosphatées attribuées à l'époque actuelle.

⁽¹⁾ L. CAYEUX, *op. cit.*, p. 753.

⁽²⁾ J. MURRAY and A.-F. RENARD. — *Op. cit.*, p. 399.

⁽³⁾ L.-W. COLLET. — Les dépôts marins, 1908, p. 207.

A.-F. Renard et J. Cornet ont reconnu, dans les craies phosphatées qu'ils ont analysées, la présence constante d'une « prodigieuse quantité d'éclats d'ossements de dimensions microscopiques »⁽¹⁾. Ce qui ne les a pas empêchés d'admettre que « ces Poissons et ces Reptiles livraient, par la décomposition de leurs tissus et de leur squelette, par leurs excréments, des matières phosphatées qui, dissoutes dans l'eau de mer..., devaient se concentrer sous la forme de phosphate »⁽²⁾.

De l'avis des auteurs, le premier caractère tire son explication de ce que la faune, qui a laissé pour témoins « une prodigieuse quantité d'éclats d'ossements », vivait « sur les rivages de la mer crétacée »⁽³⁾, et non dans une mer très profonde. Quant au second, il réunit deux données que je tiens pour contradictoires, la surabondance de débris de tissu osseux, marchant de pair avec leur dissolution à grande échelle. On verra bientôt comment doit se résoudre cette contradiction.

Des témoignages décisifs peuvent être invoqués en faveur de la fréquence des Vertébrés dans le milieu générateur des phosphates, à dater du Sénonien. Il n'en est pas de plus profond, certes, que l'abondance des microbrèches ossifères dans les phosphates sénoniens des États du Levant sous mandat, leur existence dans les phosphates d'Égypte, et, notamment celle des coprolithes, parfois en abondance dans les phosphates nord-africains. Les dents de Squales, qu'on peut recueillir en nombre dans les gisements supracrétacés et tertiaires, ont retenu l'attention des géologues et fait pressentir depuis longtemps que les poissons sont pour beaucoup dans la genèse des sédiments phosphatés. Et puis le microscope nous a révélé qu'une foule de fragments de tissu osseux, indiscernables à l'œil nu, gisent dans les phosphates en grains, ainsi que A.-F. Renard et J. Cornet l'ont reconnu les premiers. Les nombreuses analyses micrographiques réunies dans le présent mémoire font des débris de tissu osseux un élément constituant de toutes les craies phosphatées sans exception, des phosphates nord-africains, etc.

Mais comment faut-il interpréter cette diffusion et cette fréquence? Sont-elles vraiment la preuve que d'innombrables restes de Vertébrés ont été sacrifiés, suivant l'opinion des auteurs, pour fournir à l'eau de mer l'aliment nécessaire à la formation des concrétions et des grains? Au contraire, leur abondance ne signifie-t-elle pas que les débris de tissu osseux ont été épargnés par les actions chimiques, jugées nécessaires pour engendrer les gisements de phosphate de chaux? Je tiens cette seconde interprétation, qui est le contre-pied de celle qui a prévalu jusqu'ici, pour l'expression de la vérité. Des preuves sont nécessaires :

1° Un fait m'a vivement frappé tout au long de mes recherches : *Des milliers de fragments de tissu osseux, examinés au microscope en procédant à l'analyse de coupes minces, il n'en est pas un seul qui ait enregistré des traces de corrosion, si petites soient-elles.* Ce sont des éclats, des esquilles à angles vifs, ou des éléments de forme générale globuleuse, et plus ou moins usés, dont la morphologie porte l'empreinte de phénomènes de friction. Or, dans la thèse de J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet, ces débris sont assimilables à un *résidu de dissolution!*

⁽¹⁾ A. RENARD et J. CORNET. — Recherches microscopiques sur la nature et l'origine des roches phosphatées (*Bull. Acad. roy. Belgique*, 3^e sér., t. XXI, 1891, p. 154-155).

⁽²⁾ *Ibid.*, op. cit., p. 156-157.

⁽³⁾ *Ibid.*, op. cit., p. 156.

2° Les nombreux restes macroscopiques extraits de certains gisements ne trahissent pas davantage la moindre action dissolvante.

3° Au cours de la fragmentation et de la trituration des restes de Vertébrés, un grand nombre de dents ont échappé aux actions mécaniques. De l'analyse micrographique des matériaux, il résulte que leurs représentants à l'état fragmentaire et microscopique sont en moyenne très rares dans les coupes minces. La raison en est que les dents offrent le maximum de résistance au morcellement. S'il en est ainsi, *le degré de fréquence des dents fossiles nous renseigne, dans une mesure fort intéressante, sur celui des Vertébrés*. Il tend pour le moins à démontrer que ces organismes sont fort loin d'avoir joué le rôle qu'on leur a prêté, du point de vue numérique.

4° Un autre témoignage, plaçant dans le même sens, est fourni par les excréments de Poissons. Les auteurs précités ont fait jouer un rôle aux coprolithes dans l'élaboration des phosphates anciens, en ce qu'ils auraient été dissous au même titre que les ossements.

Ainsi que je l'ai noté, et pour des raisons qui m'échappent, je n'ai pu identifier un seul coprolithe dans les phosphates anté-sénoniens. Les plus anciens que je connaisse sont inclus dans ceux des États du Levant sous mandat et d'Égypte. Les craies phosphatées de France en paraissent complètement privées. En revanche, leur dispersion est très grande dans les phosphates tunisiens, algériens et marocains, et il arrive que leur concentration le soit également, sous l'influence d'une préparation mécanique poussée très loin. Les nombreux échantillons, observés à l'œil nu, sont lisses et comme polis (Pl. XX, fig. 6a). Au microscope, ils sont le plus souvent fragmentaires. Mais l'état de conservation des uns et des autres prouve à l'évidence qu'ils n'ont pas subi la moindre action corrosive. Or, de par leur composition même, caractérisée par l'association *intime* de matières organiques et de phosphate amorphe, les coprolithes devaient se prêter mieux que les ossements à l'action des agents techniques du milieu générateur.

Tout en réservant une part, que je crois faible, aux coprolithes qui ont pu disparaître, sans laisser de témoins, sous l'influence des courants et des vagues, j'estime qu'il est permis de se faire une idée de la fréquence originelle des Poissons par celle de leurs déjections, non moins que par le restes de leurs dents. Et c'est ainsi que nous apprenons, une fois de plus, que les mers génératrices des phosphates nord-africains n'ont pas été des mers surpeuplées de Poissons, comme l'exige la conception de J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet.

5° A supposer que les Poissons et Sauriens aient réellement joué le rôle qui leur est assigné, il y a dans la fréquence, très variable, de leurs débris les éléments d'une sérieuse objection. De toute évidence, il est naturel que leurs représentants soient clairsemés, rares ou très rares dans les dépôts dont ils ont fourni l'acide phosphorique, mais qu'on les rencontre à profusion dans les plus grandes accumulations de phosphate, le fait est inconcevable. D'une manière générale, plus la formation phosphatée est importante, et plus les restes de Vertébrés doivent se raréfier, puisqu'ils sont la source même de l'acide phosphorique. C'est juste le contraire qui est la règle pour les grands gisements de l'Afrique du Nord.

L. CAYEUX. — Les ressources minérales de la France d'outre-mer. IV. Le Phosphate. Les phosphates de chaux sédimentaires [*Publ. du Bureau d'Et. géol. et min. colon.*, 1935 (Extr., 14 p.)].

Ibid. — Existence de nombreuses bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. Conséquences (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCII, 1936, p. 1198).

6° Dans l'ordre d'idées envisagé, il est une question qui se pose pour ainsi dire d'elle-même : d'où vient l'acide phosphorique des gisements paléozoïques, et par quel mécanisme est-il concentré? Cette fois, les Vertébrés sont hors de cause, en tant qu'agents générateurs d'une grande masse de phosphates, et, pourtant, leur concentration peut, dans tel cas, rappeler la richesse des grands gisements nord-africains. Je fais allusion avant tout aux puissants dépôts permien, sans oublier les phosphates dévoniens du Tennessee. Force est de conclure que leur intervention ne revêt nullement un caractère de nécessité pour que prennent naissance de grands gisements de phosphates. Je n'ai garde de voir dans ce fait un témoignage décisif à lui seul, en faveur de l'enseignement qui découle de l'étude à laquelle il vient d'être procédé, mais il est indéniable qu'il complète logiquement la démonstration précédente.

CONCLUSIONS.

Pour conclure, je crois pouvoir dire que *la participation des Vertébrés à la genèse des phosphates revêt un caractère tout différent de celui qu'on leur a prêté dans le passé*. A la lumière des faits observés, cette participation ne dépasse pas les limites de ce que nous pouvons constater aujourd'hui de visu, à la fois par l'examen des gisements et par l'analyse microscopique des phosphates; et c'est à tort, croyons-nous, qu'on voit en eux l'agent principal de la fixation et de la concentration de l'acide phosphorique entraîné par les eaux douces dans la mer.

L'état de conservation des débris de Poissons me ramène logiquement à l'hypothèse, formulée sous l'empire d'observations conformes à celles que je viens de rappeler : « J'incline maintenant à croire, écrivais-je, en 1935, que la grande diffusion et la fréquence des restes de Poissons dans les gisements, comme ceux du Maroc, de l'Algérie, de la Tunisie, du Bassin de Paris, etc., tiennent uniquement à des conditions de milieu favorables à la concentration de l'acide phosphorique, dont les Poissons sont eux-mêmes bénéficiaires. Autrement dit, les restes de Poissons abondent, parce que, sous des influences à définir, certains fonds sous-marins leur fournissent une provision exceptionnelle d'acide phosphorique. »

Les données relatives à la conservation des restes de tissu osseux font ressortir une grande différence de régime entre les fonds, où sont draguées les concrétions phosphatées des mers actuelles, et ceux qui se sont révélés propices à la genèse des phosphates anciens. D'un côté, les restes de Vertébrés disparaissent en presque totalité par dissolution, et, de l'autre, ils restent intacts, sauf à dire qu'ils sont mis en pièces. Tout bien supposé, cette opposition de caractères, poussée à l'extrême, paraît mettre en cause des conditions bathymétriques très dissemblables pour engendrer les deux catégories de dépôts.

Rôle attribué à la matière organique des Vertébrés et des Invertébrés. — J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet ont assigné un rôle à la matière organique de tous les représentants du règne animal qui ont participé à la constitution des dépôts phosphatés. La raison en est, notamment, qu'elle renferme des traces d'acide phosphorique et que par son grand développement, à l'origine, dans la majeure partie des phosphates analysés, elle a pu contribuer à la formation des nodules et des grains, ne fût-ce que dans une très faible mesure.

Il en résulte que par leurs dépouilles tout entières, les restes de Vertébrés auraient été une source de phosphate de chaux pour les sédiments. Mais du fait qu'il est conservé dans les condi-

tions relatées plus haut, le tissu osseux doit être mis hors de cause, et seules les parties molles sont susceptibles d'entrer en ligne de compte.

Tout autre est le problème lorsqu'on fait appel aux Invertébrés et plus particulièrement aux organismes monocellulaires. Ceux-ci figurent en nombre incalculable dans les phosphates d'origine pélagique, tels que les craies phosphatées et les phosphates à Diatomées et à Radiolaires. Il suffit de jeter un coup d'œil sur n'importe quelle préparation de phosphate à Diatomées de Gafsa pour se rendre compte de la profusion de matière protoplasmique correspondant aux débris de valves engagés dans la presque totalité des grains. Ici, nul doute. A la totalité du microplankton observé correspond une masse énorme de matière organique. Mon enquête sur la proportion d'acide phosphorique incluse dans le protoplasma des Diatomées actuelles ayant échoué, je ne puis raisonner sur des précisions mais j'incline à croire qu'elle était ultra-faible, sinon négligeable dans la vase à Diatomées d'où sont extraits les éléments phosphatés. Il en devait être ainsi parce que, d'une manière générale, les dépôts issus des vases à Diatomées anciennes ne sont pas phosphatés. Témoin le « tripoli d'Oran » qu'on ne peut imaginer plus riche en carapaces de Diatomées. Pour ce qui est des vases à Diatomées actuelles, nous savons que leur teneur en phosphate est négligeable⁽¹⁾. Quant aux diatomites d'eau douce, que l'on peut récuser en l'espèce, elles sont non moins pauvres en acide phosphorique.

Un autre argument plaide dans le même sens. Les centaines de carapaces entières ou fragmentaires qui prennent part à la formation de chaque grain sont phosphatisées, et, de surcroît, le ciment qui les agglutine est lui-même minéralisé. Aussi peut-on tenir pour absolument certain que la matière protoplasmique, primitivement associée aux valves de chaque grain, n'a pu fournir à elle seule la totalité du phosphate qu'il représente, et il est clair qu'il s'en faut de beaucoup. Bref, la contribution redevable à la matière organique, laquelle ne saurait être plus abondante que dans le cas des Diatomées, doit être extrêmement faible.

Il en va de même pour les anciennes vases à Radiolaires phosphatisées. Si l'on envisage le cas des phosphates dinantien des Pyrénées dont les Radiolaires sont pseudomorphosés en phosphate, et plongés dans une gangue elle-même minéralisée et très développée, la conclusion formulée pour les vases à Diatomées phosphatisées s'impose à fortiori. En l'espèce, on peut encore invoquer le fait que les radiolarites anciennes ne sont pas spécialement phosphatisées. Il en serait autrement si la matière organique de ces Rhizopodes réservait une place très appréciable en phosphate de chaux.

Une démonstration analogue s'applique aux vases à Foraminifères. Au témoignage de J. Murray et A.-F. Renard les vases à Globigérines renferment généralement une petite quantité de phosphate de chaux — ordinairement moins de 1 p. 100 — mais il en est qui n'en contiennent que des traces, ou qui en sont totalement privées. Beaucoup plus développées que les vases à Diatomées et à Radiolaires, et représentant au total une masse considérable de matière organique, les vases à Foraminifères des mers anciennes n'ont pas été le siège d'une concentration exceptionnelle de phosphate, en dehors des gisements qui en dépendent.

Jugeant inutile de multiplier davantage les exemples à invoquer, notons toutefois que la cons-

⁽¹⁾ Deux analyses n'ont fourni que des traces; une troisième en accuse 0,41 p. 100 (p. 811).

titution des phosphates permians des Montagnes Rocheuses, dont on n'a pas oublié la grande importance, ne fournit aucun appui à la thèse organique.

Ces considérations laissent hors de discussion les Invertébrés dont le squelette est plus ou moins phosphaté et les restes d'algues qui sont les uns et les autres une source de phosphore pour les sédiments ayant incorporé leurs débris.

De même, elles ne portent nullement atteinte à la propriété des matières organiques en décomposition d'engendrer des sels ammoniacaux, conformément aux réactions indiquées plus haut, et de participer ainsi à la fixation du phosphate de chaux dans la mer.

Quant à l'affinité du phosphate de chaux pour la matière organique, à laquelle les auteurs paraissent attacher une grande importance pour expliquer le mécanisme de la concentration du phosphate dans les cavités organiques, elle ne paraît pas avoir joué le grand rôle qu'on lui a prêté, dès l'instant que la phosphatisation du remplissage des loges résulte toujours d'un phénomène d'épigénie du carbonate de chaux.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

Avant de me livrer à une étude systématique approfondie des phosphates sédimentaires, j'ai sacrifié, comme beaucoup de mes confrères en géologie, à la théorie de l'origine organique de leur formation, telle qu'elle résultait des travaux de J. Murray, A.-F. Renard et J. Cornet. J'y ai souscrit sans réserve, parce qu'au temps où elle a vu le jour, elle paraissait s'imposer à l'exclusion de toutes les autres. J'ai même essayé de lui fournir un nouveau point d'appui par la considération des ruptures d'équilibre, résultant de transgressions et régressions. Trop de données sont aujourd'hui en contradiction avec cette théorie pour que je continue à la faire mienne. Il me paraît maintenant hors de conteste qu'en l'état de nos connaissances, *le gros du travail de fixation de l'acide phosphorique qui dérive de la dégradation des continents échappe à l'activité organique, telle qu'elle a été connue jusqu'à présent.* Voilà comment je me trouve dans la nécessité de brûler ce que j'ai adoré, sort souvent réservé à ceux qui, conscients de leur impuissance à découvrir toute la vérité, s'efforcent inlassablement de s'en rapprocher.

c. ORIGINE BACTÉRIENNE DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

Ainsi que je le rappellerai plus loin, à bien des points de vue, l'histoire des minerais de fer oolithique de France s'apparente, de la façon la plus étroite, à celle des phosphates sédimentaires. De l'étude de ces minerais j'ai conclu que leur évolution minéralogique, généralement très complexe, était inintelligible à la lumière de la chimie minérale, et que le concours d'une activité biochimique n'était rien moins qu'indispensable pour en expliquer la formation⁽¹⁾. Quelques années plus tard, j'avais la bonne fortune de découvrir d'innombrables bactéries dans presque

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les minerais de fer oolithique de France. II. Minerais de fer secondaires (*Ét. Gîtes min. de la France*, 1922 p. 948).

Ibid. — Les minerais de fer de l'Ouest de la France. Constitution, Mode de formation, Origine du fer (*Rev. An. Mines*, 8^e sér., t. V, 1931, n^o 11, p. 15).

tous les minerais oolithiques, où je les ai cherchées⁽¹⁾. Sans être complètement élucidée, l'histoire de ces minerais se trouvait éclairée sur un point fondamental.

Ce que je viens de dire des minerais de fer oolithique s'applique, et sans réserve, aux phosphates de chaux sédimentaires. D'un bout à l'autre de leur analyse, j'ai été arrêté par la question non résolue, à mon sens, de la fixation du phosphate de chaux dissous dans la mer sous forme de grains et de nodules, et j'en suis arrivé à me persuader que le secret de cette fixation devait être demandé à une intervention bactérienne.

Pendant longtemps, j'ai cherché passionnément des bactéries, en lumière blanche, avec les plus forts grossissements dont je pouvais disposer, et en faisant varier les conditions d'éclairage. Ce fut en vain. Un jour, en scrutant des préparations tirées des phosphates permien des Montagnes Rocheuses, à la campagne, au début de la matinée, avec une lumière rasante extrêmement limpide, j'ai, non pas vu, mais simplement entrevu des corpuscules que j'ai supposé être des bactéries. Hélas, les moyens d'investigation dont je disposais ne pouvaient rien donner de plus, ce qui n'était point une raison pour ne pas persévérer dans mes recherches. Lors d'un voyage à Liège, où j'avais été appelé à l'Université pour faire des conférences de géologie, j'ai eu l'occasion d'examiner, dans le laboratoire de M^{lle} Leclercq, des microphotographies en lumière infrarouge, faisant ressortir, de façon lumineuse, des microstructures organisées, indiscernables en lumière ordinaire⁽²⁾. Appliquée aux phosphates de chaux sédimentaires, cette méthode de recherche a donné les meilleurs résultats, et fait de l'existence des bactéries une réalité⁽³⁾.

Photographiées dans les mêmes conditions les coupes minces de nos minerais de fer oolithique ne devaient pas tarder à révéler l'existence d'autres bactéries⁽⁴⁾.

Caractères des bactéries observées dans les phosphates de chaux sédimentaires. — D'une manière générale, ces organismes se présentent sous la forme de sphérules, pourvus d'une enveloppe très épaisse, et mesurant depuis 0 m. 5 jusqu'à 2 m. 5 de diamètre. On les observe tantôt isolées, ce qui est de beaucoup le cas le plus répandu et, tantôt, rassemblées en files rectilignes, ou groupées en petits amas irréguliers, etc. Pour donner une idée de leur fréquence dans une préparation de phosphate de Kourigha (Maroc), où elles abondent, notons que *dans un champ photographié avec un grossissement de 800 diamètres, correspondant à un centième et demi de millimètre carré, j'ai pu en compter plusieurs centaines, en éliminant celles qui ne sont pas situées dans le plan mis au point.* Ce degré de fréquence peut être dépassé, mais il s'en faut qu'il soit réalisé dans tous les types, étudiés. Des plages très voisines d'une même section sont d'ailleurs susceptibles de présenter de grandes différences à ce point de vue.

⁽¹⁾ Ainsi que nous l'apprendrons bientôt, cette découverte est postérieure à celle des bactéries des phosphates.

⁽²⁾ Dès mon retour à Paris, j'ai demandé à mon assistant du Collège de France, M. Randoïn, très expert en matière photographique, de s'outiller, toute affaire cessante, pour photographier mes préparations en lumière infra-rouge. Quelques semaines plus tard, des légions de bactéries, admirablement conservées, apparaissaient sur les plaques obtenues.

⁽³⁾ L. CAYEUX. — Existence de nombreuses bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. Conséquences (*C. R. Ac. Sc.*, t. 203, 1936, p. 1198).

⁽⁴⁾ L. CAYEUX. — Nouvelles données sur l'existence de bactéries dans les roches sédimentaires anciennes (*C. R. Ac. Sc.* t. 204, 1937, p. 157).

Diffusion des bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. — Ainsi que je l'ai noté, en 1936, j'ai reconnu l'existence de bactéries dans les phosphates de l'Agulhas Bank, dragués au Sud du Cap de Bonne Espérance, dans les phosphates nord-africains, où elles gisent en abondance, dans les craies phosphatées d'âge campanien, autrefois exploitées à grande échelle dans le Nord de la France, puis dans les phosphates en nodules du Turonien, du Cénomaniens, de l'Albien, du Portlandien et du Lias du Bassin de Paris.

Les phosphates paléozoïques sont non moins riches en bactéries que les précédents. Leur présence a été reconnue dans les phosphates permien des Montagnes Rocheuses, dans les phosphates dinantiens des Pyrénées, dans ceux du Dévonien du Tennessee (États-Unis), de l'Ordovicien du Pays de Galles et, enfin, dans les phosphates du Cambrien inférieur de Suède, où je ne les ai observées qu'en très petit nombre jusqu'à présent. La vérité est que j'en ai trouvé dans tous les matériaux phosphatés où je les ai cherchés.

Les échantillons originaires du Maroc (Kourigha), des Montagnes Rocheuses (Wyoming) et du Pays de Galles ont fourni des clichés qui comptent parmi les plus instructifs.

Problème de la fixation de l'acide phosphorique par des bactéries et ses inconnues. — Il y a en présence d'une part, l'hypothèse d'une activité bactérienne, sans laquelle la fixation de la plus grande partie de l'acide phosphorique dérivé des continents est tenue pour du possible, et, d'autre part, des légions de bactéries qu'on ne voit malheureusement pas à l'œuvre, mais auxquelles il est tout naturel d'attribuer le travail de fixation en question. Faire un pas de plus, dans l'espoir d'une certitude absolue, se heurte à d'insurmontables difficultés. Il ne faudrait rien moins que les pouvoirs d'un thaumaturge pour remettre en marche l'activité bactérienne et juger de ses résultats!

Ajoutons que la même incertitude plane sur toutes les conceptions analogues. L'intervention bactérienne est non moins nécessaire pour expliquer la formation des minerais de fer oolithique. Or, ces minerais renferment, eux aussi, une foule de bactéries fossiles. Quant à prouver que celles-ci ont accompli la tâche qu'il paraît légitime de leur assigner, il n'y faut pas songer.

C'est exactement ce qui se passe pour les bactéries mises en cause par Bernard Renault dans la transformation des débris végétaux en combustibles.

Bref, *tous les mécanismes bactériens, invoqués dans les conditions indiquées, comportent un point mort qui condamne les démonstrations à rester inachevées.*

Cette concession faite à une prudence peut-être exagérée, je me crois autorisé à dire qu'à défaut de preuve proprement dite, *il existe les plus grandes probabilités en faveur de la fixation de l'acide phosphorique de l'eau de mer, grâce à une activité biochimique dont les bactéries observées sont les agents.*

d. PROBLÈMES DE LA PRÉCIPITATION DIRECTE DU PHOSPHATE DE CHAUX.

Deux indices et deux seulement peuvent orienter l'opinion vers la notion de saturation de l'eau de mer en acide phosphorique.

1° Le problème de la fixation du phosphate de chaux par voie directe s'est posé pour la première fois dans le Bassin de Paris, en étudiant les craies phosphatées campaniennes. Avec les progrès de l'exploitation, on a pu observer de-ci, de-là, à la surface du mur, constitué par la craie

à *Micraster cor anguinum*, de très belles incrustations de phosphate mordoré, cristallisé et chimiquement pur. A cet égard, le gisement d'Hardivilliers, dans l'Oise, s'est révélé d'un intérêt exceptionnel. A un moment donné, on y pouvait voir ces incrustations, développées sans interruption sur une grande surface, en une série de feuillets distincts, minces et superposés. L'idée que suggère une pareille manière d'être est celle d'une précipitation directe du phosphate de chaux, préluant à la sédimentation phosphatée. L'analyse détaillée des matériaux prélevés (I, p. 241-243 et Pl. XI, fig. 33) conduit plutôt à la notion d'une précipitation, non avant le déclenchement de la sédimentation phosphatée, mais dans le phosphate en voie de dépôt.

2° Ainsi posée, la question ne vise qu'une insignifiante quantité de matière, alors que le problème de la précipitation directe se pose pour une proportion de phosphate qui peut être fort importante dans certains gisements. En ce disant, je fais allusion aux nombreux grains formés en deux temps, des craies phosphatées sénoniennes et des phosphates nord-africains

Rappelons très brièvement la constitution d'un grain banal de la craie phosphatée du Bassin de Paris. De la périphérie au centre, on rencontre (I, Pl. VIII, fig. 24) :

1° Une enveloppe de phosphate cristallisé, de grande pureté, toujours exempt de la plus petite trace, d'inclusions, et différencié par une structure concentrique extrêmement fine;

2° Un Foraminifère à test calcaire, parfaitement conservé, et jamais épigénisé si peu que ce soit, par le phosphate de chaux;

3° Le produit de remplissage des loges, primitivement constitué par une vase crayeuse très fine, qu'on peut maintenant observer à tous les états de phosphatisation, jusqu'à disparition complète du carbonate de chaux.

La même différenciation superficielle se retrouve, mais en général moins tranchée, dans une foule de grains à Diatomées de l'Afrique du Nord, représentant une minorité, par rapport à l'ensemble. Mais, en l'espèce, le schéma des éléments est plus simple, en ce sens qu'ils se décomposent en deux parties seulement.

Le trait fondamental à souligner, en ce qui concerne l'auréole de phosphate limpide et cristallisé, c'est qu'elle est invariablement dépourvue de la plus petite trace de résidu de carbonate de chaux, qu'on finit toujours par découvrir dans les phosphates résultant de la minéralisation du calcaire. Cette exclusion absolue signifie que les deux phosphates en présence correspondent à deux processus de formation foncièrement distincts, et pour tout dire que la couronne hyaline des grains ne peut résulter d'un phénomène d'épigénie. Qu'on ne le perde pas de vue, le phénomène en cause intéresse au total une masse considérable de phosphate de chaux. Par tous ses caractères, l'enveloppe hyaline des grains de la craie phosphatée évoque l'idée d'un nourrissage des éléments, maintenus en suspension dans une sorte d'eau-mère, à la fois saturée et agitée, nourrissage aboutissant à une structure concrétionnée parfaitement réalisée. En d'autres milieux, comme dans les phosphates nord-africains, cette structure concentrique est tout à fait l'exception, mais nul doute que le processus de formation ne soit essentiellement le même dans les deux cas. En conclusion, on peut écrire que *la formation des grains phosphatés met en jeu deux processus extrêmement différents : l'un qui implique l'épigénie du carbonate de chaux et l'autre une précipitation directe du phosphate de chaux.* Règle générale, le premier l'emporte de beaucoup sur le second.

Reste à savoir dans quelle mesure l'image d'une formation de grains dans une sorte d'eau-mère

traduit fidèlement la vérité. Tout bien considéré, la conclusion que les mers génératrices de ces grains étaient saturées de phosphate de chaux est à rejeter délibérément. Le mécanisme de la phosphatisation sans épigénie n'implique pas nécessairement la saturation *généralisée* de l'eau des mers en acide phosphorique. Il est d'ailleurs inconcevable que des eaux saturées d'acide phosphorique aient pu nourrir une microfaune et une microflore d'exceptionnelle richesse comme celles des phosphates nord-africains. Comment les *Foraminifères*, les *Radiolaires* et les *Diatomées*, pour ne citer que les principaux groupes susceptibles d'intervenir, eussent-ils pu vivre et prospérer dans un pareil milieu, où, d'autre part, tout semble normal? De solution à un pareil problème, il n'y en avait pas de possible, aussi longtemps que l'activité bactérienne était inconnue dans les mers à phosphates. C'est elle, et elle seule, qui nous permet de concevoir l'extraction directe du phosphate de chaux d'une eau dont la teneur en cette matière n'offre rien d'exceptionnel. Hors de là, nous sommes en plein mystère.

La constitution des nombreux grains dont le noyau procède d'un phénomène d'épigénie, et l'enveloppe d'une fixation du phosphate de chaux, sans passer par l'intermédiaire du carbonate de chaux, témoigne d'une formation en deux temps, trop évidente pour qu'il soit utile de rappeler ici les faits qui la démontrent. A la lumière d'une particularité qu'il est opportun de rappeler ici, on est tout naturellement enclin à se demander si l'addition de l'auréole de phosphate limpide, correspondant au second temps de formation, ne date pas du remaniement des grains, en vue de leur mise en place définitive, pour constituer les gisements. De source certaine, nous savons que cet épisode de remaniement est favorable à la fixation du phosphate de chaux. C'est ce que prouvent tous les complexes remaniés, dont la remise en mouvement est invariablement synonyme de phosphatisation de la totalité de leur gangue.

e. CONCLUSIONS GÉNÉRALES.

Le cycle parcouru par le phosphate de chaux a pour point de départ un état stable, réalisé dans les roches continentales, et, pour point de fermeture, un autre état stable, correspondant au phosphate de chaux incorporé sous la forme solide dans les sédiments en voie de dépôt. Tout en faisant jouer un rôle important aux organismes, les avis diffèrent sur la façon dont les deux états se rejoignent.

A la lumière des résultats d'une laborieuse analyse de gisements de tout âge et d'une foule de matériaux, le cycle en question me paraît comporter les étapes suivantes :

Nous avons appris que les continents sont pour les océans une source permanente et inépuisable d'acide phosphorique. En tout temps, les organismes marins qui ont besoin de phosphore, et tous en ont besoin à des degrés fort divers, s'alimentent aux dépens de l'eau de mer. Si bien que la précipitation directe du phosphate de chaux, par saturation de l'eau de mer, est un phénomène absolument inconnu dans les océans actuels. Ce que les organismes empruntent à la mer, ils le restituent aux sédiments en voie de dépôt, à mesure que leurs dépouilles gagnent le fond. Il s'ensuit que tous les sédiments marins qui s'accumulent de nos jours sont légèrement phosphatés. Et c'est pour la même raison que les roches sédimentaires fournissent invariablement la réaction de l'acide phosphorique⁽¹⁾.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Manières d'être et diffusion de l'acide phosphorique dans les formations sédimentaires anciennes. Conséquences (*C. R. Ac. Sc.*, t. CLXLIV, 1932, p. 1769-1773).

Ibid. — Les phosphates de chaux sédimentaires de France (*Ét. Gîtes min. France*, t. I, 1939, p. 12-16).

Les poissons et reptiles marins, d'une part, et les Invertébrés, d'autre part, ne sont pas les seuls organismes qui extraient de l'eau de mer le phosphore nécessaire à leur existence. On sait aujourd'hui que le monde des plantes fait de même, et qu'il s'agit là d'un facteur d'importance dans l'élimination de l'acide phosphorique de l'eau de mer⁽¹⁾.

A certains moments de l'histoire de la terre, et dans des conditions de milieu qui seront rappelées plus loin, la fixation du phosphate de chaux est assurée, pour la presque totalité, en des bassins privilégiés, par une grande activité bactérienne.

Ainsi se trouve confirmée une notion, maintes fois dégagée de l'analyse des dépôts sédimentaires, tant anciens que modernes, à savoir que *les microorganismes ont joué un rôle capital dans l'économie générale du globe terrestre*. C'est par leur intermédiaire qu'est fixée la plus grande partie de la silice introduite en solution dans l'eau de mer. Et c'est également par leur intervention que la majeure partie du phosphate de chaux, issu de la terre ferme, est incorporé aux sédiments. Cet enseignement est un de ceux qui dominent notre étude.

B. FIXATION DU PHOSPHATE DE CHAUX ÉLIMINÉ DE L'EAU DE MER SOUS FORME D'ÉLÉMENTS PHOSPHATÉS.

Le phosphate de chaux revêt dans les dépôts qu'il engendre quatre manières d'être, d'importance fort inégale :

- a. A l'état de *grains*, il donne naissance, presque à lui seul, à la totalité des grands gisements non remaniés;
- b. Il constitue des éléments plus volumineux que les grains, tour à tour désignés sous les noms de *rognons*, *nodules* et *concrétions*, comme si ces termes étaient réellement synonymes;
- c. La troisième modalité correspond à des *restes organiques, originellement phosphatés, ou pseudo-morphosés par la matière phosphatée*;
- d. Et la dernière joue un rôle très accessoire en tant que *ciment*.

a. MANIÈRE D'ÊTRE ET GENÈSE DES GRAINS.

L'unité grain revêt une telle variété dans sa constitution et dans son histoire qu'on peut dire, sans nulle exagération, qu'à lui seul il est tout un monde. A l'édifice phosphaté qui en forme le fond, s'ajoutent une série de substances minérales et organiques qui lui prêtent un grand intérêt.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Hypothèse de l'origine végétale des phosphates de chaux paléozoïques (*C. R. Ac. Sc.*, t. CXCVI, 1933, p. 1564-1567).

Ibid. — Les phosphates de chaux sédimentaires de France (*Ét. Gîtes min. France*, t. I, 1939, p. 97-103).

Résumons l'essentiel de ce que nous avons appris sur la distribution des grains dans le temps et sur leur constitution, avant d'aborder le problème de leur genèse.

Le type grain, dont il va être question, exclut les débris de tissu osseux, les organismes phosphatisés et les morceaux de phosphate remaniés. Ainsi limité dans son acception, il réunit des éléments dont les plus petits ne sont visibles qu'à la loupe ou au microscope, alors que les plus volumineux mesurent quelques millimètres de plus grand diamètre.

DISTRIBUTION DANS LE TEMPS. — A ma connaissance, les grains phosphatés proprement dits font leur apparition dans le Cambrien inférieur de Scanie, où leur rôle est effacé (I, p. 20), et se multiplient un peu dans le grès de Downton. Quoique formés de matériaux grenus, les gisements dévoniens du Tennessee (Etats-Unis) ne réservent qu'une place très négligeable aux éléments d'origine inorganique. Il en va tout autrement dans le Permien des Montagnes Rocheuses où le phosphate de chaux, développé à une échelle exceptionnelle, est à base de grains typiques.

En France, les grains de phosphate les plus anciens ont été rencontrés dans les minerais de fer bajociens de Privas (Ardèche) et du Callovien de La Voulte (*id.*). On en connaît dans les phosphates valanginiens de Russie (Viatka), et plus particulièrement dans le Valanginien inférieur, où ils prennent une grande part à la constitution du minerai. Ils reparaissent en très petit nombre dans les phosphates aptiens du Boulonnais, et commencent à revêtir une notable fréquence dans les phosphates turoniens du Cambrésis, dont ils constituent, à eux seuls, la totalité des matériaux phosphatés. Ils sont non moins répandus dans les nodules de tous les environs de Lille.

A dater du Sénonien, le grain de phosphate devient l'élément fondamental de tous les gisements non remaniés, et c'est alors qu'il est possible d'en démontrer la dualité d'origine. La période à cheval sur le Crétacé et le Tertiaire répond au maximum de développement du phosphate en grains, en même temps qu'aux plus grandes accumulations de phosphate sédimentaire connues.

On sait déjà que le phosphate individualisé sur le fond des océans actuels revêt la forme de concrétions et que les grains en sont presque complètement exclus (p. 812).

MORPHOLOGIE. — Sous le rapport morphologique, le grain de phosphate manifeste une grande variabilité. Des grains subsphériques, ou de forme ellipsoïdale, on passe, par maintes transitions, à des éléments très irréguliers dont la figure est, soit originelle, soit acquise sous l'influence de phénomènes de pression, auxquels ils ont réagi avec une grande plasticité. Dès qu'il se touchent, ils révèlent la physionomie de matériaux impressionnés, et parfois très déformés, au point de ne laisser aucune place au ciment.

Un rôle, tout à fait négligeable en moyenne, est réservé à des grains fragmentaires, mis en place tels quels, car les parties détachées ne se retrouvent jamais dans leur voisinage. Il s'agit, en conséquence, d'une fragmentation opérée sur le fond de la mer, en dépit de l'extrême plasticité de la matière. Eu égard aux conditions dynamiques du milieu générateur, on pouvait s'attendre à ce que cette fragmentation fût une règle et non une exception. Notons, en passant, que la glauconie se comporte exactement de même sur les fonds extrêmement troublés par les agents mécaniques.

D'une manière générale, la gangue, quelle qu'en soit la matière, n'exerce aucune action sur les grains de phosphate. A cette règle, je ne puis guère citer qu'une exception notable constituée

par des échantillons recueillis à la surface du sol dans le gisement des Meskala, et d'âge non précisé. On y voit de nombreux éléments nettement corrodés par un ciment, réalisant le caractère du silex typique. Lors des maxima d'attaque, les grains sont simplement dépolis; dans le cas contraire, ils peuvent être affectés au point que leur morphologie est profondément changée (p. 747).

CONSTITUTION. — Abstraction faite du point de vue minéralogique et chimique, qu'est-ce au juste que le grain phosphaté? Toujours pareil à lui-même à quelques nuances près, lorsqu'on l'examine à l'œil nu, réserve faite pour sa taille et sa morphologie, ce grain se révèle infiniment varié, dans sa composition et sa structure, quand on l'étudie avec des grossissements qui n'ont pas besoin d'être forts.

En ce qui touche la constitution des grains, il y a lieu de noter les manières d'être suivantes qu'il ne faut pas s'attendre à trouver réunies dans un horizon donné :

Éléments très homogènes, dans lesquels il est impossible de relever la petite trace d'un corps étranger, de nature minérale ou organique;

Grains ayant pour noyau, soit un minéral, qui est presque toujours du quartz, soit un organisme tel que Foraminifère, et beaucoup moins fréquemment un Radiolaire, un fragment de tissu osseux, un tronçon de prisme d'Inocérame, etc;

Grains doubles, formés en deux temps, composés d'un élément parfaitement individualisé, ayant servi de centre à un grain plus volumineux. En moyenne, ce sont des exceptions, mais ils peuvent acquérir normalement une très grande fréquence dans certains phosphates du Sud-Ouest du Maroc et dans l'Atlas marocain. Beaucoup plus rares encore sont des complexes, correspondant à trois temps de formation, et à deux remaniements, non compris la remise en mouvement affectant tous les grains, lorsqu'ils sont extraits de leur milieu générateur;

Éléments plus ou moins riches en valves de *Diatomées*, entières, ou réduites en menus débris souvent méconnaissables, accompagnées ou non de *Radiolaires* embryonnaires, de spicules extrêmement exigus, non attribuables aux *Spongiaires*, de *Silicoflagellés*, sans parler de microorganismes indéterminés;

Grains de grande importance théorique, englobant des inclusions de calcite, sous la triple forme d'une poussière très fine, de granules à contours rongés, ou de rhomboèdres parfaits, façons d'être susceptibles de coexister dans le même élément.

Un rôle, des plus accessoires, et généralement négligeable, quand il n'est pas nul, est dévolu à divers composés ferrugineux, tels que glauconie, pyrite et fer hydroxydé. Cette dernière substance paraît avoir été introduite secondairement dans les grains, alors que la glauconie, et, probablement, la pyrite de fer datent de leur formation.

Des inclusions d'un tout autre genre contribuent beaucoup à diversifier la physionomie des grains au microscope. Entre les éléments qui en sont dépourvus, et par conséquent très limpides, et ceux qui en sont riches au point de devenir opaques, il y a tous les intermédiaires. A ces inclusions, il faut attribuer une double origine :

Les plus répandues sont constituées par une poussière grise ultra-fine, ou par des mouchettes, des tâches irrégulières, représentant un résidu minéral (de matière organique). Les éléments de la poussière peuvent acquérir une telle densité que les grains revêtent un aspect sale

et opaque. Moins nombreux, il arrive qu'ils se concentrent par places et communiquent aux sections une apparence nuageuse très prononcée. D'ordinaire, les granulations n'obéissent à aucune règle dans leur distribution. A l'opposé, elles tendent à s'ordonner concentriquement, sans que la matière même des grains se différencie si peu que ce soit. A l'extrême limite, il se trouve des éléments qu'il faut scruter attentivement pour s'assurer que le phosphate reste étranger à la structure concentrique. De toutes les inclusions observées, ce sont de beaucoup les plus fréquentes dans le temps. Elles aussi présentent un grand intérêt théorique.

Enfin, l'inclusion d'hydrocarbures est pour les grains un élément de différenciation d'importance. Réservée aux phosphates des pays du Levant sous mandat, et principalement à ceux du Nord africain, l'intervention d'hydrocarbures se traduit de trois façons : grains en totalité brunis par une imprégnation pigmentaire non résoluble en particules constituantes, grains contenant des mouchetures brunes, des tâches, voire des débris organiques, difficiles à déchiffrer en général, constitués par des hydrocarbures solidifiés et, enfin, des grains dans lesquels les hydrocarbures se fixent en quelques zones épaisses, grossièrement concentriques. Et lorsque rien ne révèle leur présence à nos sens, ils continuent d'exister, ce que prouve l'odeur, dite bitumineuse, qui s'en dégage par le moindre frottement.

De l'inclusion extrêmement fréquente de matières organiques, susceptibles d'abonder, dans les grains, on peut conclure que ceux-ci ont été élaborés aux dépens d'une vase en cours de dépôt et non d'un sédiment quelque peu préexistant, déjà privé de ces matières. Que les représentants du microplankton, qu'on observe souvent en foule dans les grains, soient la source de ces matières, il ne peut subsister aucun doute à ce sujet. Mais il s'en faut de beaucoup que tous les grains aient conservé la totalité du microplankton et des matières organiques reçus en partage à l'origine. A cet égard, trois manières d'être sont à distinguer :

- 1° Les matières organiques coexistent avec les microorganismes dans chaque grain;
- 2° Ces matières sont exclues des grains, lesquels sont bourrés de Diatomées, etc.;
- 3° Les matières organiques figurent seules dans les éléments.

Pour donner une idée plus complète des questions qui se posent, il importe d'ajouter que dans une même coupe, il est souvent possible d'observer côte à côte des grains pétris ou exempts de matières organiques.

Ces différences se réclament probablement de multiples influences. En particulier, elles peuvent tirer une raison d'être du remaniement des matériaux et de la concentration en un même point d'éléments engendrés dans des conditions de milieu tant soit peu différentes. Il convient encore de mettre en cause la destruction des parties squelettiques du microplankton, sous l'influence des profondes modifications de nature chimique subies par les portions de vase converties en grains phosphatés.

Coloration des grains. — La question de la coloration des grains de phosphate a fait l'objet d'une étude de Victor Vincent et Pierre Boischoy⁽¹⁾, dont les recherches ont porté sur des « phosphates

⁽¹⁾ VICTOR VINCENT et PIERRE BOISCHOY. — Nature et composition de la matière organique des phosphates de l'Afrique du Nord. Étude du phosphate de Gafsa (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCVII, 1938, p. 1248-1249).

noduleux grisâtres de Gafsa». Ils ont constaté que «les grains phosphatés qui les constituent, colorés du jaune au jaune rougeâtre (rouille), abandonnent un revêtement organique sous l'action de l'acide chlorhydrique étendu». Et de l'étude limitée à ces seuls matériaux, ils ont tiré une conclusion générale : «En résumé, écrivent-ils, la coloration des phosphates sédimentaires est due à un dépôt, à la surface de leurs grains, de matière organique humifiée d'origine végétale, à laquelle s'est associée de la matière organique animale».

En réalité, la question est beaucoup moins simple. Si des grains sont pourvus d'incrustations qui contribuent à les teinter, il en est d'autres, incomparablement plus nombreux, privés de toute espèce de revêtement, et qui n'en sont pas moins colorés. D'une manière générale, la couleur des grains est due, en totalité ou en majeure partie, aux inclusions minérales et organiques décrites plus haut. Encore faut-il ajouter qu'une foule d'éléments n'ont d'autre coloration que la teinte propre au phosphate de chaux, en raison de l'absence complète d'inclusions (Maroc).

Structure et propriétés optiques. — Sous le rapport de la structure, les phosphates en grains sont loin de comporter une pareille variété de modalités :

1° Des grains de phosphate indifférencié, de beaucoup le plus répandus, sont constitués par du phosphate optiquement amorphe, d'autres, représentant une faible minorité, semble-t-il, exercent une action plus ou moins sensible sur la lumière polarisée, sans trahir pour cela la plus petite différenciation en lumière naturelle.

2° Des grains différenciés le sont de plusieurs façons :

A. Des éléments, plutôt exceptionnels, possèdent une enveloppe superficielle de faible puissance, d'une nuance différente du reste, et sans la moindre trace de structure concentrique. Il s'agit vraisemblablement de matériaux formés en deux temps;

B. Des individus, constituant une très faible minorité, sont caractérisés par une structure concentrique presque toujours confuse, généralement développée sur une épaisseur variable à partir de la surface, et par exception à l'intérieur des éléments. Il en est qui, pourvus d'un nucléus quartzeux, ne sont différenciés qu'autour de celui-ci. A quelques unités près, tous sont entièrement isotropes;

C. D'autres matériaux, beaucoup moins rares que les précédents, sont pourvus d'une couronne superficielle, toujours exempte d'inclusions, que fait ressortir en lumière blanche un aspect franchement hyalin. Différenciée ou non par une structure très finement concentrique, cette enveloppe se signale entre les nicols croisés par des amorces de croix noire, strictement limitées à la zone limpide. Il arrive que cette couronne revête une grande épaisseur (Djebel-Onk). Dans un cas très particulier, la couronne limpide, pourvue de divisions radiales très nettes, n'exerce aucune action sur la lumière polarisée (couche III, voie ferrée, Bou-Lanouar, p. 685);

D. Le maximum de différenciation est réalisé par des grains qui participent de la nature des oolithes, en ce qu'ils possèdent une couronne hyaline, caractérisée par une structure concentrique extrêmement fine, presque toujours développée autour d'un corps étranger, faisant fonction de nucléus. D'ordinaire, celui-ci est un Foraminifère [craie phosphatée du Bassin de Paris, phosphates de Palmyre (Syrie), de Boghari (Algérie) et de Taselft (plateau de Marouf, région subatlasique méridionale du Maroc)].

Telle est, ramenée à ses types essentiels de composition et de structure, la collection des grains qui prennent une part extrêmement prépondérante à la formation de nos grands gisements.

PROCESSUS DE FORMATION DES GRAINS.

La question de l'élaboration et de la précipitation de l'acide phosphorique étant supposée élucidée, il s'agit de savoir par quel mécanisme cet acide phosphorique a pu revêtir la forme de grains. Les nombreux faits observés, au cours de la présente étude, trahissent l'intervention de deux processus qui sont loin de tout expliquer : l'un se réclame des *phénomènes d'épigénie*, et l'autre, de *phénomènes de concrétionnement*. A la vérité, tous deux ont pu concourir à la formation de tel ou tel grain.

Rôle des phénomènes de substitution dans la genèse de l'unité grain. — La preuve est faite que la substitution du phosphate de chaux au carbonate de chaux a joué un rôle de tout premier plan dans la formation des grains. Elle est fournie par d'innombrables éléments, plus ou moins calcaires à l'origine, ainsi que le démontre l'existence d'un *résidu de calcite*, composé de témoins à contours corrodés. Les phosphates de l'Afrique du Nord sont parfois riches en témoignages de cette sorte. De ce nombre sont les phosphates du Hodna (Constantine). L'étude de la craie phosphatée du Nord de la France et surtout de la Belgique n'est pas moins démonstrative à ce point de vue. A vrai dire, les nombreux phosphates en grains passés en revue, pour la presque totalité, fournissent des matériaux, dont on peut dire avec certitude qu'ils étaient plus ou moins calcaires, dès le principe. Bref, il y a dans l'histoire d'une foule de grains un stade caractérisé par la substitution du phosphate de chaux au carbonate de chaux. Les autres ont-ils franchi cette même phase ? Je ne saurais l'affirmer en connaissance de cause, mais il y a les plus grandes probabilités pour qu'il en soit ainsi.

A de rares exceptions près, l'évolution minéralogique des phosphates nord-africains se complique d'un autre phénomène d'épigénie, qui se manifeste en même temps que le premier. Tous les phosphates à Diatomées renfermaient à l'origine une teneur très élevée en silice. On peut se faire une idée de celle-ci, en observant au microscope ceux de la région de Gafsa, dont les matériaux sont littéralement pétris de valves entières ou morcelées, puis ceux du Djebel-Onk, et d'autres encore, dont les grains emprisonnent un microplankton originellement siliceux, très riche et de nature variée. Si la proportion de silice était restée invariable au cours de la sédimentation, les grains ne seraient phosphatés que dans la mesure où ils étaient originellement calcaires. Autrement dit, les phosphates seraient franchement pauvres. Aussi la disparition totale, ou peu s'en faut, de cette silice, et son remplacement par du phosphate de chaux, sont-ils un épisode de la plus haute importance pour l'histoire des phosphates de chaux du Nord de l'Afrique.

Retenons, en passant, que dans le domaine nord-africain la formation des grains de phosphate implique l'élimination de masses énormes de silice, phénomène pour le moment sans équivalent en d'autres milieux.

Il y a dans la mise en évidence du facteur épigénie une donnée qui me paraît acquise en toute explication, et dans laquelle il faut voir un élément de solution, et non la solution intégrale cherchée. La substitution au carbonate de chaux et à la silice, pour ce qui concerne les phosphates

de l'Afrique du Nord, peut et doit se concevoir de deux façons : *Dans le premier cas, la substitution se fait indépendamment de tout phénomène de concrétionnement, et dans le second, elle marche de pair avec celui-ci, pour aboutir à la formation de grains d'origine mixte.*

Grains résultant d'un phénomène de substitution. — Ils dérivent de fragments de roches plus ou moins calcaires, détachés au préalable de roches-mères, et converties, sous l'influence de l'action dynamique des eaux, en éléments arrondis, ou peu s'en faut, avant le début de la phosphatisation. Bref, la formation des matériaux de cette catégorie a pour point de départ le *démantèlement d'une formation calcaire et le grenaillement des débris*. Nul doute que telle soit la marche du phénomène pour certaines craies phosphatées, car on y reconnaît aisément toutes les transitions entre les grains de craie exempts de minéralisation et ceux qui sont entièrement phosphatisés.

Grains résultant d'un phénomène d'épigénie et de concrétionnement. — Dans la seconde modalité, que j'ai toutes raisons de croire d'application plus générale, le grain ne préexiste pas à la phosphatisation. Il résulte de la minéralisation même d'un sédiment en voie de dépôt, d'une vase à Diatomées, par exemple. Le phosphate, qui n'en est pas moins un produit de substitution, agglutine et épigénise les éléments d'une vase calcaréo-siliceuse, ou silico-calcaire, tout en se concrétionnant en petits globules, phénomène qui ne laisse le plus souvent aucune trace dans la structure des grains. Les exceptions à cette règle sont légion.

Les arguments ne manquent pas pour démontrer que les éléments qui leur correspondent n'ont pas été découpés dans une roche, plus ou moins solide avant sa résolution en grains :

1° En l'espèce, il est impossible de jamais observer un seul de ces globules ayant échappé à la minéralisation, comme c'est le cas pour les morceaux de craie signalés plus haut;

2° Les grains qui renferment un unique organisme — *Foraminifère* ou *Radiolaire* — le montrent toujours centré, alors qu'il devrait occuper n'importe quelle place, et n'être pas toujours complet, si les éléments avaient été détachés d'une roche préexistante. De tels grains, rares à la vérité, ont enregistré des phénomènes d'érosion superficielle, au cours de leur remaniement. C'est ainsi qu'on peut observer un Radiolaire, primitivement centré, mis à nu d'un côté, nettement usé et non tronqué par un plan de fracture;

3° L'exemple des grains à Diatomées et des grains à microplankton très varié (Djebel-Onk, etc.) nous les montre formant des unités parfaitement individualisées, dont les organismes de bordure sont entiers, et non incomplets, comme ils devraient l'être en grand nombre si les grains avaient été détachés mécaniquement d'une roche solide, puis façonnés par les flots, pour revêtir finalement leur forme globuleuse caractéristique;

4° L'existence de grains doubles, parfois nombreux, plaide dans le même sens, car on ne peut concevoir la formation de l'élément qui sert d'enveloppe au grain central, par un phénomène de grenaillement. Il en va de même, à fortiori, pour les grains triples qui sont d'ailleurs de la plus grande rareté;

5° Une dernière donnée, peut-être moins probante, est tirée de l'impossibilité absolue de retrouver, dans le complexe des sédiments qui servent de mur aux horizons phosphatés à Diatomées, la plus petite trace des roches-mères qui auraient été mises à contribution pour engendrer les grains par fragmentation.

Ainsi que nous le savons déjà, les phénomènes de concrétionnement peuvent être admirablement soulignés par la structure des grains. Mais en moyenne, les éléments étroitement apparentés aux oolithes et ceux qui en diffèrent par un arrangement concentrique très imparfait de la matière phosphatée sont incomparablement moins répandus que les premiers. Je rappelle que trois gisements — ceux de la craie phosphatée du Nord de la France et de la Belgique, de Palmyre (Syrie) et de Boghari (Dép. d'Alger) — se détachent des autres par la proportion élevée de leurs grains oolithiques, et par la perfection avec laquelle ils reproduisent l'image des oolithes calcaires et ferrugineuses typiques. Tout grain oolithique des phosphates sénoniens du Bassin de Paris comprend deux parties, assimilables terme à terme aux deux éléments essentiels des oolithes, c'est-à-dire un noyau, représenté dans la presque totalité des individus par un *Foraminifère*, et une enveloppe à structure concentrique. L'histoire d'un pareil ensemble comporte la phosphatisation du remplissage des loges, puis le développement de la couronne à structure concentrique, autour de la coquille de Foraminifère restée calcaire. C'est le même enchaînement de processus qui se produit lorsque le noyau, au lieu d'être un Foraminifère, représente tout un complexe remanié, revêtu d'une couronne de phosphate hyalin, comme on en peut observer avec une grande fréquence dans certaines craies phosphatées du Nord de la France.

Tout se passe comme si les deux parties se réclamaient de phénomènes d'essence différente. Le premier résulte invariablement d'une *substitution* du phosphate de chaux à la vase crayeuse, comblant les chambres de Foraminifères — et non d'une précipitation de la matière phosphatée dans des loges vides, suivant une opinion maintes fois exprimée. La preuve en est qu'il existe tous les passages entre les loges remplies de vase crayeuse, exempte de la plus petite trace de minéralisation, et celles qui sont pleines de phosphate. Ce premier épisode a donc pour point de départ un phénomène d'épigénie du carbonate de chaux, calqué sur celui dont il a été question plus haut.

L'enveloppe à structure concentrique se résout en une couronne de phosphate chimiquement pur, hyaline et cristalline, de faible épaisseur en général, invariablement dépourvue d'inclusions, et réagissant sur la lumière polarisée, en donnant naissance à une amorce de croix noire. Cette fois, il est impossible de mettre en évidence le moindre indice favorable à la notion d'épigénie. Aussi, est-on logiquement conduit à voir dans la genèse de ladite enveloppe le résultat de la précipitation directe du phosphate, en milieu agité, autour des coquilles de Rhizopodes. Rien ne fait supposer que la formation de cette couronne soit contemporaine de la phosphatisation du contenu des loges, et sans doute, se rapporte-t-elle à une autre phase de l'histoire des grains. Quoi qu'il en soit, sa genèse témoigne du grand rôle joué par les phénomènes de concrétionnement dans l'histoire des grains.

Les témoignages en faveur de la différenciation de la matière phosphatée, sous l'influence des phénomènes de concrétionnement, sont nombreux dans les phosphates autres que les phosphates à Foraminifères. Les détails donnés dans les pages précédentes sur l'apparition et le développement de la structure concentrique me dispensent d'y insister, mais une addition s'impose. En général, les grains de phosphate des gisements tunisiens, algériens et marocains sont revêtus d'un mince cadre de phosphate incolore, hyalin, sans trace de structure concentrique et sans action sur la lumière polarisée. Ainsi qu'on peut s'en assurer dans les phosphates à Diatomées, cette auréole n'empiète jamais sur les microorganismes dont les grains peuvent être pétris, comme si elle représentait une couronne surajoutée aux grains, ou formés. A mon sens,

elle joue exactement dans l'histoire des grains le même rôle que l'enveloppe cristalline des grains à Foraminifères des craies phosphatées du Bassin de Paris. Pareille assimilation est d'autant plus fondée que la zone marginale en est parfois différenciée par une structure concentrique très fine, modification qui a pour corollaire un commencement d'action sur la lumière polarisée.

En conclusion, il est permis d'affirmer que les phénomènes de concrétionnement, rendus ou non sensibles à l'œil, par une différenciation de la matière, ont marqué leur empreinte, et parfois profondément, sur la grande majorité des grains phosphatés. Il est non moins certain que dans la craie phosphatée, du Nord de la France, comme dans les phosphates nord-africains, la couronne superficielle et la masse principale des grains répondent à deux entités distinctes, sans nulle transition entre les deux parties. *D'un côté, le phosphate s'est développé en dehors de tout phénomène de substitution, et de l'autre, il réalise le caractère de phosphate épigénique.* Bref, tout convient à démontrer que les nombreux grains de cette catégorie ont pris naissance en deux temps.

Tels sont, en résumé, les caractères du grain de phosphate. N'avais-je pas raison de dire, en débutant, qu'à lui seul il représente tout un monde? De celui-ci, nous n'avons encore qu'une idée incomplète, car dans tout grain, il y a ce qui se voit, et ce qui ne peut se voir au microscope quels que soient les grossissements employés. Et ce qui échappe à nos sens est de première importance pour l'histoire des phosphates de chaux sédimentaires.

b. MANIÈRES D'ÊTRE ET GENÈSE DES NODULES.

Disons tout de suite pour éviter des développements inutiles que la ligne de démarcation entre nodules et grains est purement conventionnelle, et que l'histoire des uns se confond, dans ses traits essentiels, avec celle des autres. Rappelons sans y insister que les termes nodules et rognons, d'une exception très générale, évoquent uniquement une notion de taille, et qu'à l'opposé, celui de concrétion implique une notion d'origine.

La morphologie des nodules est sujette à de grandes variations. Dans un gisement donné, ils peuvent affecter des formes sphériques ou ellipsoïdales d'une régularité géométrique. Il en est ainsi pour l'horizon phosphaté de la base du Culm des Pyrénées. Ce sont, au contraire, des matériaux anguleux, subanguleux, faisant songer à des galets imparfaits, comme on en trouve dans les phosphates du Lias du Cher, et dans le gisement sous-marin de l'Agulhas Bank. Il en est, enfin, qui réalisent des formes globuleuses, mamelonnées, voire irrégulières, qui les font classer d'emblée parmi les concrétions proprement dites.

Il arrive que tous les nodules d'un même gisement réalisent un seul et même type de roche. A cet égard, nul dépôt n'est plus instructif que celui du Culm des Pyrénées dont tous les éléments, sans en excepter un seul, procèdent d'une ancienne vase à Radiolaires. Inversement, des concentrations de nodules réunissent des roches différentes. Les gisements liasiques du Cher et celui de l'Agulhas Bank sont de ce nombre. Tout naturellement de pareils dépôts comportent des enseignements divers.

La question de la genèse des nodules se résout comme celle des grains.

Les nodules à faciès de galets imparfaits des gisements du Lias du Berry, de l'Agulhas Bank, etc., sont des matériaux remaniés, phosphatisés à la façon des grains de craie, dans la mesure où les roches-mères sont calcarifères. Les nodules du Culm des Pyrénées, que nous savons réaliser

un type exceptionnel, résultent d'un phénomène de concrétionnement du phosphate de chaux au sein d'une vase à Radiolaires. Quelques nodules de ce dernier gisement trahissent leur origine par un arrangement concentrique plus visible à l'œil nu qu'au microscope.

Somme toute, il existe des *nodules-galets* dont le phosphate est un produit épigénique et des *nodules-concrétions*, d'origine mixte, c'est-à-dire que les phénomènes de substitution et de concrétionnement participent à leur formation en étroite association. A la première catégorie appartiennent les rognons phosphatés de presque tous les gisements passés en revue.

La comparaison des nodules et de leur gangue, dans leur constitution intime, se révèle des plus instructives pour l'histoire des phosphates. Tel nodule est étroitement apparenté à sa gangue; tel autre lui est tout à fait étranger. Le premier a pris naissance *in situ*; le second est remanié, et les dépôts auxquels ils appartiennent ont des significations différentes.

c. RESTES ORGANIQUES ORIGINELLEMENT PHOSPHATÉS, OU ÉPIGÉNISÉS PAR LE PHOSPHATE DE CHAUX.

Les grains et nodules sont loin de représenter, à eux seuls, la totalité des matériaux phosphatés des gisements décrits. Ceux-ci ont reçu en partage à dater d'une certaine époque une contribution d'importance variable et parfois prépondérante, constituée par des débris d'organismes originellement phosphatés, ou phosphatisés sur le fond de la mer.

1° A la première catégorie se rapportent des restes de tissu osseux, lesquels manquent ou sont très rares dans les phosphates paléozoïques et jurassiques, et ne commencent à jouer un rôle appréciable ou notable que dans les phosphates sénoniens. Ce sont alors des éléments qu'on peut souvent compter par dizaines dans les sections minces, et qui, dans certains gisements, l'emportent au point de constituer des *microbrèches ossifères* typiques. C'est le cas pour des phosphates sénoniens des pays sous mandat du Levant et de l'Égypte, où ces roches paraissent très développées. On retrouve ces mêmes roches avec un degré de fréquence très variable dans les phosphates de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc, où le type micro-brèche n'est que très rarement réalisé.

A supposer que ces matériaux fournis par les Vertébrés soient répartis uniformément dans tous les gisements analysés, on ne serait nullement fondé à les inscrire comme éléments essentiels.

La question du rôle capital assigné aux restes de Vertébrés dans la genèse des gisements de phosphate a fait l'objet d'un examen critique dans les pages précédentes (p. 912).

Une place à part est à réserver dans cette première série de matériaux aux débris de *Brachiopodes* inarticulés, qui ont engendré par l'accumulation de leurs valves morcelées, les gisements à *Obolus* d'Esthonie.

Il faut encore signaler l'intervention de nombreux spicules d'*Alcyonaires* dans des roches phosphatées bajociennes et calloviennes, et celle de microorganismes en cloches peut-être originellement phosphatés ⁽¹⁾, observés dans plusieurs phosphates du Lias du Bassin parisien (I. p. 116 et 117).

(1) Les organismes ont été attribués avec doute à des Algues ou à des Protozoaires dans la description que j'en ai donnée.

Leur existence a été reconnue, en 1938, par G. Deflandre et L. Dangeard, dans le Jurassique moyen et supérieur, et désignés sous le nom de *Schizosphaerella*, sans pouvoir en fixer la position systématique [GEORGES DEFLANDRE et LOUIS DANGEARD, *Schizosphaerella*, un nouveau microfossile méconnu du Jurassique moyen et supérieur (*C. R. Ac. Sc.*, t. 207, 1938, p. 1115-1117)]. Depuis L. Dangeard en a signalé la présence dans la meulière des environs de Bayeux (Lettre de l'auteur, 1942).

2° Les restes d'organismes phosphatisés prennent une part considérable à la formation de nombreux gisements, se répartissant en deux catégories bien distinctes. A la première appartient le Bassin dévonien du Tennessee, où les débris d'*Echinodermes* minéralisés gisent en telle quantité qu'ils représentent presque à eux seuls les éléments générateurs du phosphate. La seconde réunit les nombreux gisements de l'Afrique du Nord, que l'on sait extrêmement riches en *Diatomées* phosphatisées. Celui de Gafsa, avec ses grains pétris de valves minéralisées en est le prototype. A ce groupe on peut rattacher les phosphates à *Radiolaires* phosphatisées comme il en existe dans le Culm des Pyrénées.

En sorte que l'énorme contribution dont il est question est fournie par des Invertébrés primitivement calcaires et surtout par des organismes monocellulaires siliceux relevant principalement du règne végétal.

En fait, tous les représentants d'organismes calcaires, inclus dans les dépôts phosphatés, peuvent être phosphatisés, mais en dehors des gisements ci-dessus désignés, ils ne prennent à leur constitution qu'une part insignifiante ou des plus accessoires, quand elle n'est pas nulle.

La contribution, à l'échelle indiquée, des Echinodermes, d'une part, des Diatomées et des Radiolaires, d'autre part, met en évidence la grande aptitude du phosphate de chaux à se substituer à des organismes calcaires et siliceux, et, d'une façon générale, à se prêter aux phénomènes d'épigénie. C'est grâce à cette propriété que les grains et nodules ont pris naissance par les processus analysés en détail dans les pages précédentes.

d. CIMENT PHOSPHATÉ.

La question du ciment phosphaté se pose différemment pour les grains et pour les nodules. En réalité, les phosphates en rognons comportent l'existence de deux sortes de gangues : l'homologue du ciment des grains, représenté par la matière qui enrobe les nodules, et la trame phosphatée qui agglutine les matériaux étrangers inclus dans les rognons. Seule la gangue phosphatée qui appartient en propre aux nodules, retiendra notre attention, après avoir caractérisé celle des grains.

Ciment phosphaté des grains. — Ce type de ciment tire son origine de l'épigénie partielle et, par exception totale, d'une gangue calcaire. Il manque dans la grande majorité des produits soumis à l'analyse, et joue un rôle généralement effacé dans les autres. Son intervention dans les phosphates exploitables peut n'être pas négligeable au point de vue pratique.

Le ciment est phosphaté dans une partie des gisements dévoniens du Tennessee et permien de l'Idaho. Il l'est dans le Valanginien inférieur de Viatka (Russie), où la gangue phosphatée dessine autour des grains de minces couronnes très régulières, composées de courtes fibres,

ordonnées perpendiculairement aux surfaces incrustées. L'intervention du phosphate de chaux est très rare dans le ciment, les craies du Bassin de Paris. En un seul cas, il constitue à lui seul la totalité de la gangue.

La traînée phosphatée du centre de la Tunisie et son prolongement dans le département de Constantine constituent une zone privilégiée pour le développement des gangues phosphatées. Celles que j'ai décrites sont, ou calcaréo-phosphatées et chargées ou non de matière argileuse, ou phosphatéo-siliceuses. En règle générale, le phosphate du ciment est indifférencié et amorphe. Par exception, dans certains phosphates de Rebiba et du Kouif, il est franchement cristallisé avec un aspect concrétionné. Dans le massif du Hodna (Constantine) la phosphatisation de la gangue est réservée à une minorité d'échantillons, et toujours développée à très petite échelle.

Dans tous les cas, le phosphate du ciment est un produit épigénique du carbonate de chaux.

Ciment phosphaté des nodules. — Le ciment dont il est question se confondant avec la totalité de la matière phosphatée qui emprisonne les minéraux et organismes des nodules, son histoire se confond avec celle des rognons. Aussi me suffit-il de rappeler qu'il est également un produit de substitution au carbonate de chaux, réalisant les manières d'être de la gangue phosphatée des grains. En d'autres termes, il est tour à tour amorphe, concrétionné et cristallisé. Par exception, le phosphate révèle une structure globulaire, rappelant tout à fait celle de l'opale des gaizes (nodules infracrétacés du Boulonnais).

C. TRANSPORT ET CONCENTRATION DES MATÉRIAUX PHOSPHATÉS EN DES POINTS D'ÉLECTION CORRESPONDANT A NOS BASSINS PHOSPHATÉS.

Intervention de deux et exceptionnellement trois milieux dans la formation des gisements de phosphates sédimentaires.

De même que dans l'histoire des minerais de fer oolithique de France, il y a lieu de distinguer deux milieux et deux temps successifs dans l'élaboration des gisements de phosphates étudiés. Dans le cours de mes analyses, j'ai mis en relief les faits extrêmement décisifs qui imposent cette notion. Groupons d'abord ceux qui intéressent les phosphates en grains.

1° *Phosphates en grains.* — A. Les grains phosphatés qui renferment des Diatomées, pour ne citer que ceux-là, sont inclus dans une gangue qui en est toujours dépourvue, même lorsque le ciment est lui-même phosphaté.

B. Dans les phosphates dont la gangue est plus ou moins chargée de quartz, les grains de phosphate n'en contiennent jamais, pour ainsi dire, un seul représentant. Les phosphates du Hodna, et, en particulier, ceux de M'Zaïta, sont riches en exemples très démonstratifs sous ce rapport. Ils fournissent, en effet, des coupes dont la gangue renferme des grains de quartz par centaines, alors que ce minéral n'intervient nullement dans la constitution des éléments de phosphate de chaux.

D'une façon générale, les inclusions minérales de la gangue sont exclues des grains.

C. Un troisième exemple, qui intéresse le problème de la mise en plan des hydrocarbures, fournit des données non moins instructives :

Certaines plages du ciment, fortement brunies, renferment des grains phosphatés exempts d'imprégnation.

Inversement des éléments, très pigmentés en brun, sont plongés dans un ciment d'imprégnation (II, p. 412).

En conséquence, *les grains de phosphate sont assimilables à des corps étrangers, par rapport au ciment qui les agglutine*. Et la règle ne souffre pas d'exception. Il s'ensuit que *le milieu où s'élaborent les grains ne se confond nullement avec celui où ils s'accumulent*.

Tout en restant *ne varietur*, dans ses grandes lignes, pour la totalité des phosphates en grains, le mécanisme de remaniement peut se compliquer, du fait qu'il rassemble des grains empruntés à deux milieux différents. Les exemples d'une pareille dualité ne manquent pas. Dans un phosphate du Kouif (couche V, II, p. 422), il existe côte à côte des grains phosphatés de deux couleurs différentes, les uns, de couleur jaune paille, sont les seuls qui englobent des microorganismes; les autres, de teinte brune, ne renferment jamais d'inclusions d'aucune sorte. De toute évidence, ces matériaux se réclament de deux roches-mères distinctes. Dans le banc constant de (M'Zaïta) se trouvent réunis des éléments hydrocarburés, renfermant des Radiolaires et des Diatomées, et d'autres, privés d'hydrocarbures et de microorganismes. Notons encore l'existence, dans la petite couche (banc constant) du périmètre de Tocqueville, d'éléments étroitement associés, les uns, pétris de rhomboèdres et granules de calcite, les autres dépourvus d'inclusions. Les premiers ont été engendrés en milieu sursaturé de carbonate de chaux, et les seconds, aux dépens de matériaux dont la phosphatisation marchait de pair avec la dissolution complète du carbonate de chaux (II, p. 550), etc.

Dans le même ordre d'idées, il est évident que les minéraux divers, rassemblés dans les phosphates en grains, se réclament, eux aussi, de plusieurs milieux. On peut tenir pour certain, par exemple, que le quartz libre dans les phosphates en grains, représenté par de tout petits éléments, ne procède jamais du milieu générateur des matériaux phosphatés, du fait même qu'il en est toujours éliminé. D'ailleurs, d'une façon générale, les dimensions des grains de quartz et des éléments phosphatés varient en toute indépendance, lorsqu'ils sont associés. Il y a également les raisons de croire que la glauconie, qui fait cortège aux grains à Diatomées et Radiolaires, a pris naissance sur des fonds différents de ceux où les éléments phosphatés ont été élaborés. L'exclusion absolue des carapaces de Diatomées est une des raisons qui plaident en faveur de cette opinion.

En somme, les cuvettes où s'accumulent les grains de phosphate sont le rendez-vous d'éléments de multiples provenances, conclusion qui s'applique, notamment, aux matériaux phosphatés.

2° *Nodules phosphatés*. — Ceux des nodules phosphatés qui rentrent dans la catégorie des nodules-galets, c'est-à-dire la très grande majorité de ceux qui ont été analysés, se réclament de l'intervention de deux milieux au moins dans leur histoire. De ce nombre sont tous les nodules jurassiques, infracrétacés, cénomaniens et turoniens de France. Des fonds où ils ont pris naissance, ils ont été extraits par des courants, puis rassemblés en couches assimilables à des bancs de conglomérats. Ce n'est là qu'un des traits qui les apparentent aux grains phosphatés.

Il arrive que les étapes franchies se multiplient et qu'entre le point de départ des nodules et leur point d'arrivée s'intercale un stade complémentaire. Tel est le cas pour des nodules infra-

crétacés du Bassin de Paris et pour des rognons de la craie glauconieuse phosphatée de Rouen et de Pernes-en-Artois, dont l'histoire comporte l'intervention de trois milieux distincts : *le milieu générateur originel, un milieu où s'effectue le remplissage phosphaté de fissures développées sous la mer, et le milieu où les nodules ont pris place définitivement dans la craie* (II, p. 185).

A chaque milieu, correspond ou peut correspondre un temps de phosphatisation. — Les phosphates en grains réalisent deux types bien distincts : ceux qui n'ont jamais été agglutinés, tels que les phosphates de Kourigha, privés de ciment, ne comportent qu'un seul temps de minéralisation, antérieur à la mise en place des matériaux. Il s'y en ajoute un second lorsque les grains sont engagés dans une gangue calcaire développée *in situ*, partiellement phosphatisée. Et dans le cas spécial, où des phosphates à ciment calcaire sont soumis à des phénomènes de décalcification et transformés en sables phosphatés, il peut se produire une migration d'acide phosphorique, entraînant de nouveaux phénomènes de minéralisation et, partant, un troisième temps de phosphatisation. (I, p. 246.)

Les concrétions phosphatées proprement dites répondent à une seule et unique génération de phosphate. Dans le cas général, les nodules-galets ne comportent qu'un seul temps de minéralisation, correspondant exactement à celui des grains des phosphates sableux de Kourigha. Mais lorsqu'ils sont fissurés, remaniés, puis injectés de phosphate oblitérant toutes les fissures, une deuxième génération est à enregistrer. Par exception, on en peut distinguer une troisième, ayant pour pendant la gangue phosphatée des grains. Il en est ainsi lorsque des nodules, redevables de leur existence à deux générations de phosphate, ont été remaniés et entraînés dans un nouveau milieu, où ils ont été incrustés de phosphate (I, p. 152).

Somme toute, l'histoire des nodules-galets est, dans son ensemble, plus compliquée que celle des grains.

D. RECHERCHE DU MILIEU GÉNÉRATEUR DES ÉLÉMENTS PHOSPHATÉS DES GISEMENTS DU MAROC, DE L'ALGÉRIE ET DE LA TUNISIE.

D'une manière générale, le problème se pose pour tous les gisements de phosphates en grains, mais c'est sans contredit pour ceux de l'Afrique du Nord qu'il présente le maximum d'intérêt, eu égard à leur extension géographique qui est immense, à leur importance à tous égards et à la somme des connaissances acquises, en ce qui les concerne.

Nul doute qu'il y ait un intérêt majeur à connaître la région élue qui a donné naissance aux éléments phosphatés. Où faut-il la situer par rapport aux dépôts qui en procèdent? En d'autres termes, y a-t-il quelque part au voisinage des bassins phosphatés des dépôts à Diatomées non phosphatisés, assimilables à des témoins épargnés par l'érosion des fonds sur lesquels les matériaux phosphatés ont été élaborés? A cette question je ne suis pas en mesure de répondre, et personne n'est à même de le faire pour le moment. La raison en est qu'on ignore tout de la constitution intime des sédiments synchroniques des phosphates à Diatomées de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc. Aussi longtemps qu'il en sera ainsi, le milieu générateur des phosphates en grains risque de rester ce qu'il est pour l'instant, c'est-à-dire un *milieu fantôme*. Cela ne veut pas dire qu'on n'en puisse parler utilement, et développer à son sujet des considérations susceptibles de nous mettre sur la trace d'une partie de la vérité.

Dans l'ordre d'idées indiqué, le domaine envisagé comporte deux régions, distinctes par les données qu'elles fournissent en vue de résoudre le problème posé : c'est, d'un côté, le Maroc, pour lequel on peut esquisser une démonstration intéressante, ne fût-ce que par les faits qu'elle met en cause, et, de l'autre, l'Algéro-Tunisie, qui va nous laisser dans l'indécision.

1° *Maroc*. Deux ordres de faits mettent en évidence des phénomènes de transgression de la sédimentation phosphatée dans le temps et dans l'espace, qui me paraissent intéresser la question de l'emplacement du milieu générateur des grains.

A. La note préliminaire du Professeur Arambourg sur les Vertébrés fossiles des phosphates du Maroc⁽¹⁾, dont il a été question, au début de l'analyse des phosphates marocains, fournit une précieuse contribution à l'étude du milieu générateur à situer. Elle nous enseigne que les phosphates des Ganntour, déposés à proximité de l'Atlantique, sont, dans leur ensemble, plus anciens que les phosphates des Ouled-Abdoun, et que la couche la plus récente de la formation phosphatée, correspondant à l'horizon exploité, occupe un niveau compris entre les couches II et III des mines de Bou-Jniba et de Bou-Lanouar. On peut traduire les faits en disant que le gros des phosphates des Ganntour est d'âge crétacé, alors que la masse principale des phosphates des Ouled-Abdoun date de l'Eocène. J'y vois une raison d'admettre que le milieu générateur se trouvait quelque part dans l'Atlantique, en eau plus ou moins profonde.

Il est à supposer que cet état de choses a duré aussi longtemps que la sédimentation phosphatée qui a doté le Maroc de ses puissants gisements. Deux faits sont à noter à ce sujet : la transgression signalée n'est nullement synonyme d'absence, dans les Ganntour, de phosphates plus ou moins synchroniques des couches supérieures des Ouled-Abdoun, car, ainsi que l'a reconnu G. Arambourg, le système marno-calcaire d'âge éocène, supérieur aux phosphates exploités, contient de multiples horizons phosphatés. La coupe que j'en ai relevée (fig. 66, p. 716), y mentionne, en effet, plusieurs passées phosphatées. A vrai dire, et c'est le second fait à rappeler à cette place, les concentrations phosphatées ne correspondent pas nécessairement au maximum d'activité sédimentaire du milieu, et il semble non moins simple de les expliquer par une activité ininterrompue de la sédimentation phosphatée, dont les produits sont dispersés ou concentrés, suivant le régime des courants. *La diffusion des grains phosphatés dans les stériles, associés aux couches de phosphate, atteste, ainsi que je l'ai noté plusieurs fois, la continuité de la genèse des grains entre le commencement et la fin de la sédimentation phosphatée, dans un bassin donné.*

B. Non moins instructifs sont les faits relatifs à la région méridionale du Maroc. A. Beaugé rappelle qu'en 1927, au cours de recherches près de la côte, entre le Cap Rhir et Agadir, l'Office a mis en évidence jusqu'à 6,50 p. 100 de phosphate tricalcique dans le Cénomanien⁽¹⁾.

Le même auteur nous apprend que le gisement des Meskala, développé à faible distance de l'océan, en avant de l'Atlas, n'est intéressant au point de vue exploitation que par ceux de ses phosphates relevant du Maëstrichtien inférieur⁽²⁾. Associés à des craies à Baculites, ces phos-

⁽¹⁾ C. ARAMBOURG. — Note préliminaire sur les Vertébrés fossiles des phosphates du Maroc (*Bull. Soc. Géol. France*, 5^e sér., t. V, 1935, p. 413-439, pl. XIX et XX).

⁽²⁾ A. BEAUGÉ. — *Op. cit.*, p. 26.

⁽³⁾ *Ibid.*, *op. cit.*, p. 26.

phates ne se retrouvent pas à l'Est dans le gisement de Chichaoua, dont la formation phosphatée date principalement du Nummulitique.

Tout se passe comme si la mer à phosphates s'était avancée avec le temps dans la direction de l'Est, ainsi qu'elle l'a fait au Nord des Djebilet. A la vérité, il s'agit uniquement, en l'espèce, d'une *transgression de la sédimentation phosphatée*, et non de la mer.

Si l'on pénètre dans le versant Nord de l'Atlas, à la lumière des observations de L. Moret, il est clair que la transgression se fait plus ample, en même temps qu'elle affecte un domaine beaucoup plus étendu. Alors qu'à Imintanout, les phosphates se développent de part et d'autre des calcaires à Thersités⁽¹⁾, ils sont tous postérieurs à ces calcaires dans les gisements qui s'échelonnent de l'Ouest à l'Est (plateau de Médinet, Amismiz, plateau de Kik, Ouanina), jusqu'à une grande distance à l'Est du méridien de Marrakech.

Le même phénomène s'observe sur le versant méridional de l'Atlas, où les phosphates sont également supérieurs aux calcaires à Thersités (Agued n'Mougard).

Bref, *tout se passe, comme si, à partir de l'Atlantique, il y avait déplacement vers l'Est de la sédimentation phosphatée, à la fois dans le temps et dans l'espace.*

Retenons que par leur maximum de concentration à proximité ou à faible distance de l'Atlantique, non moins que par les phénomènes de transgression vers l'Est, accusés par la sédimentation phosphatée, les phosphates du Maroc évoquent l'idée d'un lien générateur avec cet océan. Que les phosphates du Maroc sont tributaires de l'Atlantique, c'est à peu près tout ce que nous pouvons conclure, au point de vue de l'emplacement du milieu générateur des éléments phosphatés. Quel qu'en soit l'intérêt, un pareil enseignement ne résout pas, à lui seul, toutes les difficultés de la question.

2° *Algéro-Tunisie*. — Le second domaine, étroitement apparenté au précédent par la nature de la roche-mère des phosphates, caractérisée comme ancienne vase à Diatomées typique, en est très largement séparé au point de vue géographique. Il est vrai qu'un gisement témoin, celui de Boghari, les relie sous le rapport minéralogique, mais ce gisement se réclame d'un milieu générateur différent des autres, du fait qu'il procède d'une vase à Globigérines. En sorte que les deux domaines restent présentement isolés, comme le seraient deux provinces originellement indépendantes. Il s'ensuit que le problème de situer le ou les milieux générateurs des phosphates algéro-tunisiens doit se résoudre en toute indépendance de celui des phosphates marocains. De toute évidence la question est largement dominée par les faits suivants :

A. Développement maximum des phosphates dans le Sud tunisien, et son prolongement dans le département de Constantine (Djebel-Onk), où la puissance du minerai atteint son maximum;

B. Vase à Diatomées, génératrice des grains phosphatés, réalisant, et de beaucoup, son caractère le plus typique dans le Sud de la Tunisie;

⁽¹⁾ LÉON MORET. — Recherches géologiques dans l'Atlas de Marrakech (*Serv. des Mines et de la Carte Géol. du Maroc. Notes et Mémoires*, 1931, p. 156-173).

EDOUARD ROCH. — Études géologiques dans la région méridionale du Maroc occidental (*Serv. des Mines et de la Carte Géol. du Maroc. Notes et Mémoires*, 1930, p. 467-468).

C. Intervention des phosphates maëstrichtiens, uniquement dans la Tunisie méridionale, avec cette particularité qu'ils sont développés de façon tout à fait rudimentaire au Nord du grand bassin de Gafsa (à Metlaoui, par exemple), et qu'ils arrivent à mesurer plusieurs mètres d'épaisseur au Sud dudit bassin (Djebel-Berda). Le faciès réalisé par la couche inférieure du Djebel-Berda, bourrée de glauconie, et très apparentée d'aspect à certains « tuffeaux » landéniens du département du Nord, est à prendre en considération à notre point de vue.

En bonne logique, il faut admettre, semble-t-il, que les phosphates maëstrichtiens sont venus du Sud.

Pour ce qui concerne les phosphates éocènes, beaucoup plus intéressants à tous égards, la question est fort loin d'être aussi simple. En l'espèce, la paléontologie ne nous est d'aucun secours. A son défaut, on peut faire état des données suivantes : après avoir analysé les phosphates sud-tunisiens, j'ai souligné le fait indiscutable que les phosphates exploités dans les différents gisements sont loin d'être toujours synchroniques (II, p. 521). C'est dans le plus méridional de tous, celui de M'Dilla, qu'ils sont les plus rapprochés du mur et, partant, les plus anciens. Des défauts de concordance très marqués dans le temps existent entre les multiples sièges de la compagnie de Gafsa. A Metlaoui, les deux couches mises en valeur se trouvent à grande distance du toit, alors qu'à Aïn-Moularès, situé plus au Nord, ils en sont très rapprochés, etc. Il en résulte que *les maxima de concentration des grains sont de plus en plus transgressifs vers le Nord*. A s'en tenir là, on est fondé à conclure qu'il y avait quelque part, au Sud, une source de grains, entraînés vers le Nord. Si logique soit-elle, cette solution soulève quelque difficulté, de par l'absence d'affleurements maëstrichtiens et éocènes, au delà de la limite méridionale du Bassin, telle qu'elle est connue. Cette question a déjà fait l'objet d'un examen, en étudiant le régime bathymétrique du Bassin de Gafsa et l'extension vers le Sud de la mer à phosphates (II, p. 325).

Jusqu'où s'est fait sentir cette influence dans la direction du Nord? Une fois franchie la zone que des auteurs tiennent pour émergée, on entre dans une province à caractères propres. Le minerai est grossier; des poudingues, dont les matériaux sont tirés du complexe phosphaté, jouent un grand rôle, et la formation diffère, dans son faciès général, de celle du Sud, au point que rien ne trahit une influence méridionale. Les partisans de l'existence d'un îlot émergé, à la séparation des deux bassins, ne manqueront pas d'en tirer un argument en faveur de leur opinion.

On sait que le régime du centre tunisien s'est étendu au département de Constantine, et tout particulièrement à la région du Hodna, dont les phosphates sont très apparentés à ceux de la Tunisie centrale. D'apports de matériaux phosphatés, venant du Sud, il ne peut être question, et c'est du côté nord, dans la direction de la Méditerranée, que devait se trouver le centre générateur des grains. J'incline à croire qu'il en était de même pour la Tunisie centrale. En raison de notre ignorance absolue sur la constitution des dépôts synchroniques des phosphates, situés du côté de la Méditerranée, il est impossible de faire un pas de plus dans cette voie.

Rien ne fait supposer, d'autre part, que le milieu générateur des grains doive être situé quelque part vers l'Est. La distribution géographique des gisements du centre tunisien et leur extension à l'Ouest met obstacle à cette orientation. De plus, en dépit de ce qui a été écrit à cet égard, l'existence de phosphates éocènes est inconnue en Tripolitaine. Sans pouvoir attribuer en toute certitude un rôle actif à la Méditerranée, j'estime que son intervention revêt un caractère de grande probabilité. En l'affirmant, je m'inspire de l'étroite parenté du microplankton inclus dans les grains phosphatés du Maroc et de l'Algéro-Tunisie, parenté qui me paraît impliquer l'existence

d'une large communication entre les mers à phosphates des deux régions. Par malheur, je ne connais pas suffisamment la géologie de l'Afrique du Nord pour émettre des hypothèses paléogéographiques répondant à cet enseignement. Au risque de décevoir ceux qui escomptaient une solution intégrale dans cet ordre d'idées, je préfère m'en tenir à cette brève indication.

Le problème de situer les centres générateurs s'est déjà posé pour les nombreux minerais de fer oolithique de France, et il s'est posé exactement dans les mêmes termes, sans qu'il ait été possible d'en reconnaître un seul⁽¹⁾. Ces milieux générateurs sont-ils destinés à rester indéfiniment des *milieux fantômes*⁽²⁾? Oui, sans doute, pour un certain nombre qui ont été détruits. Quant aux autres, leur identification exige la connaissance intime de tous les dépôts contemporains des gisements analysés dans le domaine considéré, c'est-à-dire pour chaque cas envisagé des recherches de très longue haleine. Et il en est, au surplus, qui sont présentement inaccessibles.

Pourquoi n'ajouterais-je pas que l'image des milieux générateurs n'est pas très nette dans mon esprit. Je veux dire que je ne me représente pas bien les fonds sous-marins où s'élaborent les grains de phosphate, aux dépens d'une vase à Diatomées, en présence de légions de Bactéries. A la vérité, le détail du mécanisme en jeu m'échappe du tout au tout. Est-ce là une objection grave et décisive contre la notion de leur existence? A cette question je réponds catégoriquement que les faits sur lesquels elle repose constituent des témoignages irrécusables, à la portée de tous ceux qui feront le nécessaire pour se familiariser avec eux.

5° CONDITIONS DU MILIEU GÉNÉRATEUR DES GISEMENTS.

A. GENÈSE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE EN MILIEU TERRIGÈNE ET PÉLAGIQUE.

Les explorations marines nous enseignent que les boues et sables verts réunissent à peu près la totalité des concrétions phosphatées draguées dans les océans actuels. En rapprochant de ce fait la découverte des nodules phosphatés des sables verts albiens d'Angleterre et du Bassin de Paris qui furent pendant longtemps les seuls phosphates connus dans les terrains sédimentaires anciens, il était tout naturel de supposer que dans le passé, comme de nos jours, les boues et sables verts et partant les sédiments *terrigènes* constituaient le seul milieu favorable à la genèse des phosphates de chaux. La découverte des craies phosphatées de Belgique et de France est venue modifier notre optique à ce sujet en nous révélant l'existence de gisements de phosphates très riches développés en milieu *pélagique*.

Un des résultats les plus clairs de l'étude systématique des phosphates sédimentaires est de démontrer que non seulement ils sont susceptibles de prendre naissance dans les milieux les plus divers mais que les concentrations de sédiments phosphatés de beaucoup les plus importants

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les minerais de fer oolithique de France. II. Minerais de fer secondaires (*Ét. Gîtes min. France*, 1922, p. 937.)

⁽²⁾ J'emprunte ce terme au roman de Loti, *Fantômes d'Orient*. Le héros du roman retourne à Constantinople, dans l'espoir de retrouver Azyadée qu'il a abandonnée quelques années auparavant. Il s'y livre à des investigations tenaces et mouvementées. Finalement, il découvre la tombe de sa bien-aimée dans un cimetière des environs de Constantinople. Azyadée n'est plus. En bien des cas, le milieu générateur cherché n'est plus et mérite d'être qualifié de fantôme.

rentrent dans la catégorie des dépôts pélagiques. On sait en effet, aujourd'hui, que des *vases à Foraminifères*, des *vases à Diatomées* et des *vases à Radiolaires* — les unes et les autres typiques — renferment de puissants dépôts phosphatés.

L'argile rouge des grands fonds reste hors de cause dans cette énumération, pour la raison qu'elle est vraiment autre chose qu'un sédiment à proprement parler et que, somme toute, elle relève des produits chimiques. De surcroît, on ne lui connaît pas d'équivalent dans la gamme des sédiments passés en revue.

En fait, *tous les sédiments anciens correspondant aux formations terrigènes et pélagiques actuelles, argile rouge et formations coralliennes non comprises, peuvent renfermer des dépôts phosphatés.* Il y a de ce chef une très profonde différence entre les mers anciennes et les mers actuelles, différence à laquelle on est loin d'avoir prêté une attention suffisante.

Caractères des dépôts phosphatés, fonction de leur milieu générateur.

Le développement des phosphates en milieu terrigène se traduit par une grande variété de produits, par la genèse presque toujours exclusive de nodules ainsi que par des teneurs en acide phosphorique qui ne sont jamais élevées. La variété des dépôts est véritablement très grande du fait que leurs milieux générateurs sont extrêmement influencés par la terre ferme. Ce qu'elle peut être dans un domaine pourtant très restreint comme celui des phosphates ordoviciens du Pays de Galles mérite d'être rappelé. J'ai reconnu : des *phosphates à débris d'Echinodermes*, des *lumachelles phosphatées à Brachiopodes inarticulés*, des *phosphates à spicules d'Eponges siliceuses*, des *phosphates à spicules d'Eponges calcaires*, des *phosphates ferrugineux oolithiques*, des *phosphates très alumineux*, des *phosphates feldspathiques*, des *phosphates pyriteux* et des *phosphates pauvres ou très riches en matière carbonneuse*. Nos gisements du Lias du Bassin de Paris, tous très pauvres, trahissent une diversité comparable, principalement sous le rapport organique.

Le deuxième trait dominant, c'est-à-dire le faciès nodule réalisé de préférence par les phosphates subordonnés aux sédiments terrigènes, s'explique sans la moindre difficulté dès l'instant que les nodules ont été remaniés et qu'ils sont assimilables à des galets. C'est donc en milieu très agité, nullement favorable à la genèse de petits éléments, qu'ils ont pris naissance. Au surplus l'élaboration des grains implique presque toujours le concours de microorganismes exclus des milieux favorables à la formation de volumineux matériaux par voie dynamique.

Quant aux basses et moyennes teneurs en phosphate de chaux, elles sont la conséquence de l'intervention constante d'actions mécaniques qui mettent en mouvement de nombreux éléments clastiques, lesquels sont incorporés aux roches-mères des nodules.

Tout autres sont les milieux pélagiques en ce qu'ils soustraient les sédiments aux influences perturbatrices de la terre ferme et qu'ils créent pour les organismes des conditions d'existence uniformes sur de grands espaces. Ainsi se trouvent écartés les facteurs qui engendrent les valeurs matériaux et introduisent dans les dépôts des éléments minéraux et organiques qui sont pour les phosphates des sédiments terrigènes une cause de variété et de pauvreté.

Bref, on peut dire, en extrême synthèse, que les *phosphates des dépôts terrigènes sont des phosphates très grossiers et jamais riches et qu'à l'opposé ceux des sédiments pélagiques sont des phosphates grenus et les seuls qui puissent fournir de hautes teneurs.*

A ma connaissance cette règle souffre une exception — et une seule — des plus curieuses et qui n'en restreint nullement l'intérêt. Bien qu'issus d'une vase à Radiolaires des plus typiques, les phosphates dinantiens des Pyrénées réalisent le caractère de nodules, et, de surcroît, ils sont pauvres. Mais nous sommes ici en présence, non de *nodules-galets* mais de *nodules concrétions* engendrés sur place (I, p. 70), en présence de la grande quantité de matière carbonneuse qui s'y trouve emmagasinée. L'inclusion de cette matière et la silice des Radiolaires, convertie en quartz concentré dans le dépôt, sont pour les nodules une cause d'appauvrissement. Si bien que contrairement à la règle générale énoncée, les phosphates pélagiques en question sont noduleux et jamais riches.

B. INSTABILITÉ DU MILIEU GÉNÉRATEUR DES GISEMENTS. RUPTURES D'ÉQUILIBRE.

a. CAS DES PHOSPHATES EN GRAINS.

Des multiples notions acquises aux cours de la présente étude, il en est une qui surpasse en fécondité toutes les autres. Je veux parler des perturbations sous-marines enregistrées par les dépôts de phosphates en grains et plus spécialement de celles qui donnent le branle à la formation des gisements.

J'ai trop insisté, chemin faisant, sur l'instabilité qui régit la sédimentation phosphatée, pour qu'il soit nécessaire d'y consacrer de longs développements à cette place. Maintes observations ont démontré que le régime dynamique pouvait varier à un moment donné en des points très rapprochés. A cet égard, les faits relevés par les ingénieurs de la mine du Kouif (Constantine) sont particulièrement instructifs. Ils nous enseignent notamment que des stériles qui séparent les couches de phosphate, les uns changent de nature et les autres sont susceptibles de disparaître tour à tour, leur place restant marquée par des lacunes. C'est ainsi que les couches I, II et III, normalement séparées par des calcaires, peuvent se fondre en un seul et unique horizon « si l'on tient compte des *ravinements* et de leur récurrence, ai-je écrit, des multiples *horizons perforés*, de l'existence de phosphates à faciès de *graviers*, et je pourrais ajouter du *remaniement* de silex, des *variations dans les puissances*, sans parler de celles qui affectent les *teneurs*, il apparaît clairement que le milieu générateur a été soumis à bien des vicissitudes » (II, p. 420). En vérité, l'image en question peut être tenue pour l'expression du cas général.

1° *Ruptures d'équilibre enregistrées par la formation de la craie phosphatée du Bassin de Paris.* L'existence d'un lien de causalité entre les ruptures d'équilibre et la genèse des phosphates de chaux s'est manifestée pour la première fois en soumettant à une étude préliminaire les craies phosphatées sénoniennes du Bassin de Paris⁽¹⁾.

Dès 1897, j'ai établi l'existence d'une « connexion entre les gisements de phosphate du crétacé supérieur du Bassin de Paris et les grandes ruptures d'équilibre de la mer crétacée », et noté la nécessité de « porter l'attention sur ce point pour éclairer toutes les circonstances *physiques* et *chimiques* qui ont présidé à la genèse de ces gisements. »

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Contributions à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (*Mém. Soc. Géol. Nord*, t. IX, 2, 1897, p. 432).

A la vérité, les perturbations dont il va être question sont loin d'avoir l'envergure de celles que j'ai fait intervenir en 1897. Et ce serait lui appliquer une portée qu'elles n'ont pas du point de vue général, que de les confondre avec les transgressions et régressions qui ont maintes fois modifié le domaine des océans au cours des temps géologiques. Sauf dans le cas très particulier des phosphates carbonifères, il s'agit uniquement de mouvements locaux ou régionaux sans répercussion connue sur les rivages voisins.

Au risque de me répéter, je crois devoir reprendre l'exemple de la craie phosphatée du Bassin de Paris en raison du caractère lumineux de son enseignement. Des mouvements, dont la résultante se traduit par la formation de hauts fonds, interrompent la sédimentation crayeuse à un moment donné en même temps qu'ils inaugurent un régime tout nouveau. Des courants ravinent et durcissent la surface de la craie à *Micraster coranguinum*, et des organismes perforants entrent en jeu.

A cette craie extrêmement fine et d'origine franchement pélagique, font suite, d'abord, des sédiments de nature conglomérée, puis une craie phosphatée grossière. Le régime générateur de la formation phosphatée s'étend sur une partie seulement de quatre départements (Pas-de-Calais, Aisne, Somme, Oise) et prend fin par un retour progressif et parfois rapide de la sédimentation crayeuse. Tel est le schéma général qui s'applique à presque tous les sédiments analysés. Mais une nouvelle perturbation, celle-ci localisée sur une petite portion du bassin générateur, ramène la sédimentation phosphatée, inaugurée ou non par un dépôt congloméré. A titre d'exception, ce phénomène de récurrence peut porter à trois et quatre le nombre d'horizons phosphatés subordonnés à la craie blanche (Somme, I, p. 205).

Trois faits essentiels ressortent clairement de l'analyse de la craie phosphatée du Bassin de Paris :

1° L'aire caractérisée par la sédimentation phosphatée était circonscrite de tous côtés par une sédimentation crayeuse; autrement dit le *domaine où sont concentrés les phosphates s'étendait en plein milieu pélagique* (I, p. 253).

2° Les matériaux des formations conglomérées sont empruntés en totalité à la craie, et pas un seul galet ou fragment de roche ne dérive de la terre ferme;

3° En dépit de son caractère grossier, la craie phosphatée fournit un résidu minéral insoluble ne différant par rien d'important de celui de la craie à *M. coranguinum* sous-jacente.

C'est à la lumière de ces faits que j'ai formulé, en 1897, la conclusion que *tout se passe comme si la profonde perturbation qui a été le point de départ de la formation des craies phosphatées du Bassin de Paris, n'avait modifié en rien les rapports du bassin phosphaté avec les rivages voisins* (I, p. 253).

A cet enseignement s'en ajoute un autre non moins dicté par les faits, à savoir que *les ruptures d'équilibre ont créé pendant toute la sédimentation des conditions bathymétriques se rapprochant de celles qui sont réalisées normalement à proximité des rivages*.

Dans l'enchaînement des circonstances qui ont substitué la sédimentation phosphatée à la sédimentation crayeuse, il est évidemment nécessaire de réserver une place aux courants. Mais leur intervention s'inscrit parmi les multiples conséquences des perturbations mises en cause sans qu'il soit possible de voir en elle l'unique facteur de la concentration des phosphates. La vérité est que les modifications d'importance subies par la mer, les emprunts qui lui sont faits

pour constituer les dépôts conglomérés, le trouble profond jeté dans la sédimentation et l'activité des courants ont leur source unique dans une rupture d'équilibre qui change brusquement les conditions de milieu. Dans le cas notamment de la craie phosphatée du Bassin de Paris, dont le gisement a fait de très nombreuses observations, il serait vain de chercher en dehors de la région affectée par les perturbations la cause déterminante des actions dynamiques enregistrées de maintes façons par toute la formation phosphatée, murs compris;

2° *Généralité des ruptures d'équilibre dans la mer à phosphates de l'Afrique du Nord.* Il s'agit maintenant de passer du particulier au général. Or, ce qui est vrai pour la craie phosphatée du Bassin de Paris l'est également, mais à une échelle considérablement amplifiée, pour les phosphates tunisiens, algériens et marocains, et d'autres encore selon toute probabilité. En l'espèce, la multiplication des horizons phosphatés, qui est l'exception pour le Bassin de Paris, devient une règle, et il arrive que le nombre en soit fort élevé.

Les couches exploitées, pour ne parler que des principales, répondent à un cycle de phénomènes, toujours pareil à lui-même. Règle générale, le mur en est modifié. Tantôt il est raviné ou perforé, tantôt il est à la fois raviné et perforé. Et de surcroît, il acquiert souvent une très grande consistance. En outre des morceaux en ont été détachés fréquemment pour être incorporés aux premiers sédiments phosphatés, qui, de ce chef, peuvent revêtir un caractère très grossier. Et au bout d'un certain temps, correspondant à l'élaboration d'une couche, la sédimentation redevient ce qu'elle était avant la perturbation qui l'a modifiée presque du tout au tout. Puis une nouvelle rupture d'équilibre ramène la même succession d'événements correspondant à un deuxième cycle, et ainsi de suite.

En bref, la formation phosphatée a enregistré toute une série de perturbations génératrices d'importants changements de régime dont l'intervention est non seulement favorable à la genèse des grains de phosphate, mais la condition même de leur élaboration et de leur concentration. Les faits sont tels que la loi des ruptures d'équilibre formulée pour le Bassin de Paris domine toute l'histoire des phosphates de l'Afrique du Nord. Et de même que dans le Bassin de Paris, *les perturbations ont créé en pleine mer des conditions de milieu engendrant des dépôts qui, par leurs caractères physiques, font supposer à tort le voisinage d'une côte.*

Ainsi que je l'ai noté antérieurement, les transformations qui viennent d'être rappelées ne s'observent pas toujours et partout à la base des horizons phosphatés de l'immense domaine considéré. A la vérité, elles ne manquent jamais dans les couches principales, et nombre d'autres de puissance extrêmement réduite ou non les ont également subies. Au surplus elles sont susceptibles de se développer ou de manquer en des points peu éloignés d'un horizon donné parce que les conditions de milieu étaient instables. Elles le sont tout particulièrement dans le Massif du Hodna, en Algérie, où les coupes de la formation phosphatée changent d'une concession à l'autre; et dans l'étendue d'un même périmètre elles accusent de profondes différences. La comparaison des coupes levées en des endroits très rapprochés de la formation de Kalaa-Djerda (versant du Sif) fournit également une excellente illustration de ce régime (II, p. 405, fig. 36 et 37).

On ne conçoit d'ailleurs pas que les courants distributeurs des grains phosphatés limitent strictement leur action aux surfaces affectées par les ruptures d'équilibre. Par la force des choses, des concentrations de grains peuvent se produire en des régions qui échappent à leur action

directe. En bonne logique, il faut s'attendre à observer des horizons phosphatés dont la base n'a pas enregistré les modifications habituelles.

Pour conclure, disons qu'il est tout naturel que le régime à la fois cyclique et rythmé qui est redevable de son existence à la récurrence des ruptures d'équilibre ne marque pas son empreinte de la même façon partout.

CONCLUSIONS.

L'étendue du domaine où les ruptures d'équilibre se sont manifestées est à première vue en pleine contradiction avec la règle énoncée plus haut, à savoir que les perturbations en question ne sont que des mouvements locaux ou régionaux d'une nature autre que les transgressions et régressions. Je tiens pour démontré que *les ruptures d'équilibre mises en cause ne sont jamais synchroniques sur de vastes étendues*. — Par exemple, dans un bassin tel que celui de Gafsa, les grandes concentrations phosphatées de gisements qui ne sont pas très éloignés, comme ceux de Metlaoui et de M'Dilla, ont pris naissance à des niveaux différents, et les perturbations inscrites à leur base ne se correspondent pas du tout. Il en va de même pour la Tunisie centrale, où la comparaison terme à terme n'est possible que pour des gisements contigus, tels que ceux de Kalat et Sénam et de Rebiba. Entre ces derniers et ceux de Kalaa Djerda et du Konif relevant de la même bande il est de toute impossibilité de synchroniser les ruptures d'équilibre.

Cette constatation faite, envisageons les choses de plus haut. Le domaine des phosphates en grains de l'Afrique du Nord, qui s'étend depuis l'Atlantique jusqu'à la Tunisie incluse, est loin d'avoir été soumis à la sédimentation phosphatée au même moment dans toute son étendue. La non-concordance des horizons phosphatés en des points éloignés, qui est un fait acquis pour la Tunisie, est surtout de règle au Maroc où C. Arambourg⁽¹⁾ a démontré que les phosphates des Gantour sont dans leur ensemble plus anciens que ceux des Ouled-Abdoum.

L'image des ruptures d'équilibre génératrice des phosphates de chaux, qui me paraît le plus conforme à la succession des événements observés dans le Nord de l'Afrique, est celle de mouvements plus ou moins circonscrits non synchroniques débutant à la fin du Crétacé au Sud-Ouest du Maroc et se propageant vers l'Est, jusqu'en Tunisie où ils relèvent du Suessonien. Ce sont des mouvements de nature oscillatoire, sans nulle parenté avec les transgressions et régressions, et qui se manifestent à chaque perturbation par un relèvement des fonds sous-marins, prélude d'un changement radical dans les apports sédimentaires. Un mouvement de sens opposé au premier, mais non brusque ou rapide comme le précédent, met fin à la sédimentation phosphatée et un régime pélagique reprend le dessus en attendant qu'un nouveau trouble ramène un épisode phosphaté.

La notion des ruptures d'équilibre, qui s'affirme à chaque instant dans notre étude, et celle de mouvements oscillatoires qui découle de leur récurrence n'éveillent pas nécessairement dans notre esprit l'idée de sédimentation phosphatée. Les deux phénomènes sont non moins étroitement associés dans la genèse des craies noduleuses du Bassin de Paris, sans qu'il en résulte

⁽¹⁾ C. ARAMBOURG. — Note préliminaire sur les Vertébrés fossiles des phosphates du Maroc (*B. S. G. Fr.*, 5^e sér., t. V, 1935, p. 413 à 439, pl. XIX-XX).

pour cela la formation de grains de phosphate. La raison en est que l'intervention des ruptures d'équilibre est une condition nécessaire pour élaborer des concentrations de phosphate, mais qu'elle ne suffit pas à elle seule, sujet qui rappellera bientôt notre attention.

b. CAS DES PHOSPHATES EN NODULES.

Il résulte avec évidence de notre analyse que la formation et la concentration des phosphates en nodules requièrent également l'intervention de rupture d'équilibre, avec cette particularité qu'à une exception près les perturbations se produisent dans le domaine des sédiments terrigènes et non pélagiques. Mais tout bien pesé la genèse de gisements comme ceux de l'Albien du Bassin de Paris se confond tout entière avec la première phase de la formation des gisements de grains, laquelle est caractérisée par la production de phosphates conglomérés. De sédimentation phosphatée proprement dite, il n'en existe pas. Au surplus, tandis que les concentrations de phosphates en grains sont sujettes à répétition dans un gisement donné, règle générale, mais non absolue, les couches de nodules sont unes. Hormis ces différences tout est pareil en tant que milieu générateur.

C. PHÉNOMÈNES DE REMANIEMENT SOUS-MARINS. ENSEIGNEMENTS TIRÉS DE LA CONSTITUTION DES COMPLEXES PHOSPHATÉS REMANIÉS DANS LES PHOSPHATES EN GRAINS.

Phosphates en grains. — Les phénomènes de remaniement sous-marins mis en évidence en étudiant les minerais de fer oolithique de France ont leur pendant dans l'histoire des phosphates de chaux sédimentaires. Ces phénomènes exercent leur action à deux moments différents de l'histoire des concentrations de matériaux phosphatés. Non seulement les grains ont été extraits de leur milieu générateur, transportés et concentrés sur des fonds susceptibles d'être très différents de ceux qui leur ont donné naissance, mais, au cours même de la sédimentation, des débris ont été détachés du minerai, puis remis en mouvement, et finalement réincorporés au dépôt en voie de formation. Règle presque absolue, ces débris sont transportés en des points du bassin où s'élaborent des phosphates appartenant à d'autres types.

Les matériaux remaniés en cours de sédimentation méritent considération, car ils sont des plus instructifs à de multiples titres. Deux faits essentiels sont à signaler dès l'abord en ce qui les concerne :

- 1° *Tous sont phosphatés;*
- 2° *Les stériles qui font partie de la formation n'ont pas été mis à contribution.*

En conséquence, il ne peut être question de chercher dans ces horizons phosphatés préexistants la source de ces produits. Une preuve de plus est-elle jugée nécessaire, il suffit d'analyser les phosphates concentrés en une seule et unique couche, comme il s'en trouvait dans le Sénonien du Bassin de Paris, et d'y observer des complexes phosphatés remaniés pour démontrer *ipso facto* qu'ils ont été empruntés à la couche même qui les renferme.

La notion de remaniement sous-marin s'étend également aux séries phosphatées dans lesquelles les stériles calcaires font place aux stériles dolomitiques, ainsi qu'aux silex qui leur sont subordonnés. Tel est l'enseignement qui se dégage de l'étude de la formation phosphatée de M'Zaïta (dép. de Constantine) renfermant à la fois des galets de silex et de dolomie élaborés à ses dépens (II, p. 562). Telle est aussi la conclusion formulée pour les silex inclus dans les gisements de la Tunisie centrale (II, p. 438).

Par l'ampleur qu'ont revêtue les phénomènes de remaniement dès le début de la sédimentation des craies phosphatées du Bassin parisien et durant le dépôt des phosphates nord-africains, on peut juger de l'état d'agitation des fonds, aux points où s'est effectué le morcellement du minerai.

Le degré de fréquence des complexes remaniés est sujet à de grandes variations. Dans la presque totalité des gisements nord-africains ils sont peu répandus, à telle enseigne que l'analyse de plusieurs sections minces est souvent nécessaire pour en observer un.

Font exception les phosphates du toit de la formation dans les affleurements du bled Djemd-jenna (Djebel-Onk), lesquels fournissent des préparations, contenant plusieurs dizaines de complexes remaniés de types variés (II, p. 516). Nulle part, ils ne sont aussi fréquents qu'à la base de la craie phosphatée du Bassin de Paris, où ils abondent, ainsi que dans la région de Palmyre (Syrie). Ils sont également loin d'être rares dans certains gisements de l'Atlas.

Point n'est besoin de rappeler ici toutes les variantes qu'on peut observer dans les produits remis en mouvement. Sous ce rapport, cinq faits principaux sont à retenir :

1° A de rarissimes exceptions près, la constitution de ces matériaux est distincte de celle du minerai dans lequel ils sont inclus, non seulement par leur gangue, mais par les éléments en présence, et il arrive qu'ils en soient très différents;

2° Presque tous les complexes remaniés sont pourvus d'un ciment entièrement phosphaté en quoi ils sont généralement plus riches que les minerais dans lesquels ils gisent;

3° Règle générale, les grains constituants sont plus petits que ceux du phosphate qui les renferme;

4° Dans la grande majorité des matériaux observés, la gangue est très développée et les grains peu fréquents. Le contraire a pour représentants de rares débris dont les grains se touchent et laissent au ciment une place des plus mesurées. Lorsqu'il en est ainsi le nombre des éléments phosphatés peut s'élever à une dizaine dans l'épaisseur de la section. Un des complexes rencontrés dans la couche II de Metlaoui en contient quinze, serrés les uns contre les autres;

5° Quel que soit le degré de fréquence des minéraux détritiques dans la couche-mère, telle qu'elle est connue présentement, ils manquent presque toujours dans les complexes remaniés. De rares exceptions admettent la présence du quartz en proportions plus élevées que dans le minerai enveloppant.

L'exclusion des matériaux étrangers à l'horizon considéré, qui est un fait constant, n'entraîne pas nécessairement l'uniformité de constitution des produits phosphatés remaniés. La vérité en peut être telle qu'elle implique l'existence de grands changements de caractères dans l'espace

occupé par une couche donnée. L'absence de matériaux étrangers à cet horizon signifie que le remaniement marche de pair avec la sédimentation phosphatée et qu'en un ou plusieurs points le phosphate en voie de dépôt a été attaqué par des courants, morcelé, et ses débris incorporés dans la couche-mère qui continue à se déposer. Dans tous les cas, cette succession d'événements se déroule sous la mer. Mais comme nous le savons déjà elle n'est pas seule à témoigner en faveur de la notion de phénomènes de remaniement sous-marins et de l'existence de courants érodant le fond de la mer.

De la comparaison des complexes remaniés et du phosphate dans lequel ils sont inclus se dégage la conclusion que le transport des produits remis en mouvement se fait de préférence au large, dans la direction de la terre ferme, ou plus exactement vers des profondeurs moindres, et que pour une très faible minorité le mouvement s'oriente en sens inverse. Les complexes à petits grains dépourvus de quartz clastique, qui l'emportent de beaucoup en moyenne, rentrent dans la première catégorie.

C'est un fait très digne d'attention que le remaniement des fragments de minerai, dans les conditions indiquées soit, pour ainsi dire toujours synonyme d'enrichissement, phénomène particulièrement accusé, dans les complexes à base de ciment. D'interprétations à retenir, on n'en voit guère que deux : 1° l'enrichissement du minerai est originel ; 2° il est la conséquence de la remise en mouvement, explication qui a toutes chances d'être l'expression de la vérité, du fait qu'on ne trouve presque jamais en place de phosphates réalisant les caractères des fragments remaniés.

Nodules phosphatés. — Les détails que j'ai consacrés à deux reprises au remaniement sous-marin des nodules phosphatés m'interdisent d'en reparler longuement à cette place. Toute concentration de nodules-galets comme celles de l'Albien du Bassin de Paris implique un phénomène de remaniement. Mais l'histoire de certains de ces nodules se complique d'un changement de milieu, mis en évidence par l'existence de fissures remplies de phosphate autre que celui des rognons. De tels nodules se réclament d'au moins deux remaniements avant leur mise en place définitive.

D. INTERVENTION CONSTANTE DES COURANTS.

Il y a dans les pages précédentes maints témoignages en faveur de l'intervention de courants dans toutes les mers qui ont élaboré des phosphates. Des actions dynamiques infiniment diverses s'en réclament. En particulier, la mise en place des matériaux et, dans bien des cas, leur façonnement, les phénomènes de préparation mécanique qui se manifestent de cent façons au cours de la sédimentation phosphatée, etc. sont à inscrire à leur actif.

Que les grains phosphatés soient bourrés d'organismes ou non, l'activité sédimentaire qui concentre les matériaux phosphatés est de nature mécanique et nullement organique.

Dans le cas répondant à la formation des craies phosphatées du Bassin de Paris, la rupture d'équilibre se manifeste d'abord à nos sens par un ravinement du substratum et l'élaboration à ses dépens de matériaux grossiers inclus à la base du complexe phosphaté, épisode correspondant au maximum de l'activité dynamique. Après quoi, la sédimentation phosphatée proprement dite débute, toujours caractérisée par le transport et la mise en place des éléments, jamais engendrés *in situ*.

Ce schéma s'applique à la genèse de tous les gisements de phosphate en grains du Nord de l'Afrique, sauf à dire qu'une place variable est dévolue au conglomérat de base d'ailleurs susceptible de manquer. Au surplus, les témoignages de leur intervention y sont beaucoup plus nombreux et plus expressifs, par suite de la multiplication des horizons phosphatés. C'est ainsi que chaque formation phosphatée met en évidence toute une succession de remaniements et de remises en mouvement de matériaux divers, comprenant, notamment, de volumineux « boulets » calcaires (Tunisie méridionale et Djebel-Onk), des silex et surtout des morceaux de minerais remaniés généralement submicroscopiques, tous empruntés au complexe phosphaté qui les renferme. Ces matériaux plaident non seulement en faveur de l'intervention de courants, mais de remaniements sous-marins d'une fréquence insoupçonnée. Bref, des données aussi variées que décisives prouvent que la sédimentation phosphatée s'est opérée dans un milieu extrêmement agité.

L'intervention des courants ressort avec évidence de la constitution des nodules albiens et cénomaniens du Bassin de Paris composés de deux phosphates se réclamant de deux milieux différents (I, p. 177, 185). Elle se manifeste avec une évidence plus grande encore lorsque de pareils matériaux ont subi l'influence d'un troisième milieu (I, p. 152).

Une autre démonstration, tout aussi probante, est fournie par les perforations des nodules-galets concentrés à la base de la craie phosphatée à *B. quadrata* du Bassin de Paris. Il résulte de leur analyse que certains d'entre eux ont été perforés à plusieurs reprises et qu'ils l'ont été sur des fonds différents du fait que les produits de remplissage des perforations d'un seul et même nodule peuvent être de nature très différente. Nul doute que sous l'influence de courants, ils ont gagné leur emplacement définitif par étapes successives (I, p. 225).

Il n'est pas inutile d'ajouter que l'action des courants peut être soulignée par une *stratification inclinée*, voire *entrecroisée*, des matériaux phosphatés (Rebiba). Elle l'est encore par des *ripple-marks*, affectant ou non le minerai lui-même (II, p. 420, 467, 508), et par de profonds *sillons* creusés dans le phosphate exploité, ordonnés parallèlement avec une grande régularité, tantôt suivant les lignes de plus grande pente dirigées vers le fond d'un synclinal (II, p. 405), tantôt disposées en sens contraire et conséquemment suivant des lignes de niveau (II, p. 555).

Dans le cas des nodules-galets, et non des concrétions proprement dites, il est hors de conteste que le façonnement, le remaniement et la concentration des matériaux, en lits assimilables à des bancs de conglomérat, se réclament, eux aussi, de l'action de courants de fond, auxquels un rôle très important est dévolu. Des renseignements tirés de la remise en mouvement de certains nodules, il résulte que ces courants les ont entraînés vers la terre ferme, ou dans la direction du large. Les deux manières d'être sont parfois réunies dans les matériaux d'un seul et même gisement de l'Albien du Bassin de Paris et jamais, à ma connaissance, dans un nodule donné. La mise en parallèle des deux phosphates d'un rognon, fissuré sur le fond de la mer, lorsque les produits de remplissage sont très fins, ne laisse aucun doute sur l'amplitude du déplacement qui doit se chiffrer par des dizaines de kilomètres (I, p. 177).

Il serait aisé de multiplier les données qui plaident dans le même sens. Celles qui précèdent paraissent suffire et le témoignage en est clair. Bref, tout démontre que réserve faite pour l'activité biochimique qui peut seule expliquer la concentration et la fixation de l'acide phosphorique, *la formation même des couches, quelle qu'en soit l'importance, est l'œuvre des courants*, et cela est vrai qu'il s'agisse de phosphates en grains ou de couches de nodules-galets.

E. ASSIMILATION DES SYNCLINAUX PHOSPHATÉS A DES CUVETTES SÉDIMENTAIRES.

Préexistence des cuvettes synclinales à la sédimentation phosphatée. — Dans l'Afrique du Nord où les phosphates sont connus sur de vastes étendues, les formations phosphatées participent à la constitution de grands plis, conservés ou représentés par de petits témoins, suivant les régions considérées.

L'exemple de la Tunisie nous offre d'excellents représentants des deux manières d'être sous la double forme : lambeaux de cuvettes et de grands synclinaux.

A la lumière de ce que nous avons appris en étudiant les craies phosphatées du Bassin de Paris et certains phosphates nord-africains, on est tout naturellement enclin à se poser deux questions qui, loin d'être confinées dans le domaine théorique, revêtent une grande portée pratique.

1° *Les gisements tunisiens, par exemple, ont-ils pris naissance dans un seul et même bassin converti en une série de synclinaux, lors de la surrection des dépôts?*

2° *Les synclinaux actuels représentent-ils autant d'anciennes cuvettes douées d'une certaine individualité au point de vue sédimentaire?*

Avant d'aborder l'examen des questions rappelons que les craies phosphatées du nord de la France se sont développées sur un fond qui venait de se plisser, et en étroite liaison avec de petites cuvettes synclinales, ainsi que l'exploitation a permis de le démontrer, sans l'ombre d'incertitude (I, p. 247).

Dans le domaine de l'Afrique du Nord les problèmes se posent avec une toute autre envergure, et du fait que la mise en valeur en est encore à ses débuts, pour ainsi dire, et l'exploitation limitée au voisinage de la surface, il n'est pas encore possible de procéder à toutes les vérifications nécessaires pour trancher la question en parfaite connaissance de cause. Il ne s'ensuit pas que nous manquions de données à mettre en valeur pour aborder le sujet.

De prime abord, on est tenté de voir dans les différences importantes que fait ressortir la comparaison détaillée des coupes de Metlaoui, d'une part, de Redeyef et Ain-Moularès, d'autre part, la conséquence d'un morcellement d'un grand bassin de sédimentation par un mouvement précurseur des grands mouvements orogéniques, morcellement entraînant la formation de cuvettes secondaires, indépendantes dans une certaine mesure. Ainsi s'expliquerait le défaut de concordances des coupes, que l'on sait poussé très loin. A la vérité, la sédimentation, profondément troublée, dont les gisements fournissent le témoignage, se prête mal à l'extension d'un horizon donné avec les mêmes caractères sur une aire considérable. Si bien qu'aucune certitude n'est à notre portée dans cette orientation.

Envisageons le problème à résoudre dans sa généralité. Dans le cas d'une cuvette synclinale, individualisée tardivement aux dépens d'une grande nappe de dépôts par des phénomènes de plissement, il est impossible de prévoir ce que seront les phosphates en profondeur, sauf à dire qu'ils peuvent, ou s'enrichir, ou s'appauvrir, ou rester ce qu'ils sont. Point capital, il n'y a aucune raison pour que les teneurs s'ordonnent par rapport aux bords de la cuvette. Si ordonnance il y a, elle doit être réglée par la configuration et le développement du grand bassin de sédimentation, dont la cuvette considérée n'est qu'une fraction. Mais dans le cas contraire, c'est-à-dire

si les synclinaux actuels se confondent avec d'anciennes cuvettes individualisées avant le début de la sédimentation phosphatée, la répartition des teneurs doit être fonction, notamment, de la distance au bord des cuvettes, de l'extension et de la profondeur de celles-ci.

Nulle vérification de cette nature n'a été faite pour la craie phosphatée du Bassin de Paris. A la vérité, elle eût été sans objet, la préexistence des cuvettes étant démontrée par l'exploitation; et, de surcroît, la méthode était peut-être vouée à un échec, en raison de l'extrême exigüité des cuvettes.

Pour des raisons de convenance vis-à-vis des Sociétés qui, toutes, m'ont réservé un accueil qui ne pouvait être meilleur, j'éviterai dans les développements qui vont suivre d'insister sur les conséquences pratiques, susceptibles de découler avec le temps, de la notion des synclinaux préexistants à la sédimentation phosphatée.

Dans les pages consacrées à l'analyse de phosphates de l'Afrique du Nord, j'ai étudié deux exemples, lesquels ne mettent en cause que des unités de faible étendue. Lors de l'exploitation du petit synclinal du Dyr situé à l'ouest du gisement du Kouif (Constantine), on a pu constater que le phosphate s'appauvrisait à l'intérieur du bassin (I, p. 431). Cette réduction doit être interprétée comme le résultat d'une préparation mécanique, éliminant les éléments denses sur les bords de la cuvette et entraînant les plus légers, sans valeur, dans les parties les plus profondes. Ce que l'on peut traduire en disant que le bassin était déjà constitué au début de la sédimentation phosphatée, et, partant, que le synclinal auquel il correspond préexistait au dépôt des phosphates.

Un deuxième exemple, particulièrement probant, est fourni par une cuvette secondaire du gisement de L. Gentil au Maroc, La descenderie qui l'a attaquée a révélé une chute extrêmement rapide des teneurs avec la profondeur, impliquant le même enseignement que la réduction observée dans le Bassin du Dyr.

Lorsque, dans un avenir plus ou moins éloigné, l'extraction devra gagner en profondeur, il faudra s'attendre, dans le cas des synclinaux de formation antérieure à la sédimentation phosphatée, à ce que, sous l'influence des courants et de la pesanteur, les matériaux légers, peu ou point phosphatés, se multiplient de plus en plus dans la direction du large aux dépens du phosphate et que, par voie de conséquence, les couches s'appauvrissent graduellement avec la profondeur.

Malgré le petit nombre de témoignages formels à invoquer pour l'instant, je me crois fondé à formuler la règle suivante : *l'amaigrissement progressif du minerai avec la profondeur constitue un excellent critérium des cuvettes préexistantes.*

Dans l'hypothèse où ce critérium est applicable aux grandes accumulations de phosphate de l'Afrique du Nord, on peut conclure que des phénomènes de ridement sous-marins, analogues à ceux qui ont prélué au dépôt de craies phosphatées, ont transformé le futur bassin générateur des phosphates de l'Afrique du Nord en une série de cuvettes synclinales, jouissant d'une certaine autonomie au point de vue sédimentaire. D'amplitude toute différente des mouvements enregistrés par la craie du bassin de Paris, ces ridements sont probablement l'amorce de ceux qui, postérieurement au dépôt des phosphates, ont profondément marqué leur empreinte sur toute l'Afrique du Nord.

Le fait que ces considérations sont réservées au Bassin de Paris et aux phosphates nord-africains est loin de signifier que la notion de préexistence des synclinaux à la sédimentation phosphatée ne puisse s'appliquer à d'autres domaines phosphatés. Pour aborder l'étude d'un pareil

sujet, il est nécessaire de faire entrer en ligne de compte ces données que je suis loin de posséder pour tous les gisements passés en revue.

F. BATHYMÉTRIE DES MERS A PHOSPHATES.

Il ne peut être question de fixer ici les conditions bathymétriques qui ont présidé à la formation de tous les dépôts phosphatés décrits dans ce mémoire. Pour être traitée en connaissance de cause une pareille étude exige l'examen approfondi de chaque gisement et l'analyse de nombreux spécimens. Or, il est clair qu'une partie seulement de mes recherches répond à cette condition nécessaire. Pour tout dire, ne pouvaient entrer en ligne de compte que les gisements analysés sur place.

Le problème bathymétrique ne se pose dans toute sa plénitude que pour les phosphates subordonnés au dépôt pélagique. Pour les autres la connaissance de leur milieu générateur et de ses conditions bathymétriques découle clairement de la nature des sédiments auxquels ils sont associés. On trouvera dans les descriptions qui leur ont été consacrées les renseignements utiles à ce point de vue.

En conséquence, les considérations qui vont être développées visent uniquement les *phosphates à Foraminifères*, les *phosphates à Radiolaires* et les *phosphates à Diatomées*. Le peu que je sais sur les phosphates permien des Montagnes Rocheuses les exclut forcément de la présente étude. Cette lacune, assurément regrettable, ne restreint en rien l'intérêt des conclusions formulées, attendu que les solutions proposées sont des solutions particulières, non susceptibles d'être amalgamées pour en tirer une solution générale.

Il est à noter, en outre, que le problème est déjà résolu dans la mesure du possible, pour les deux premiers types.

Phosphates à Foraminifères. — Je me borne à rappeler ici que d'une étude très détaillée de la craie phosphatée du Bassin de Paris résultent deux enseignements principaux :

1° *Les conditions de gisement et la constitution de la craie phosphatée témoignent d'un milieu à caractère littoral;*

2° *Sa formation implique l'existence au large d'aires momentanément placées dans des conditions de profondeur se rapprochant de celles qui sont réalisées normalement près des rivages.*

Le régime nouveau, créé autour des grandes accumulations phosphatées, fait son apparition après une perturbation générale qui affecte profondément toute la région où vont, par l'intermédiaire de courants, s'entasser les grains de phosphate. Au début, cette perturbation se traduit par le ravinement et le durcissement du fond, puis par la genèse de dépôts très grossiers non tributaires de la terre ferme. Par exception, de nouvelles ruptures d'équilibre interviennent, celles-ci très limitées dans l'espace, et la récurrence des horizons phosphatés en est la conséquence.

Du point de vue qui nous occupe, *la caractéristique fondamentale du milieu générateur est fournie par des profondeurs extrêmement faibles réalisées au large du domaine pélagique.*

Sauf pour les craies phosphatées des environs de Meaux, très apparentées à nos craies phosphatées du Nord de la France, j'ignore dans quelle mesure ces conditions bathymétriques sont celles des autres phosphates sénoniens à Foraminifères.

Phosphates à Radiolaires. — J'ai énuméré les phosphates dinantiens des Pyrénées et de la Montagne Noire, à l'exclusion pour le moment de ceux de Russie. Ils constituent une entité profondément distincte sous tous les rapports des phosphates de la craie. Une rupture d'équilibre d'importance, que souligne une grande lacune, prélude au dépôt d'une vase à Radiolaires typique. En l'espèce, ni indices de changements de profondeur, ni phénomènes de remaniement, ni traces d'action de courants n'ont été enregistrés. A vrai dire, il s'agit d'une accumulation de concrétions phosphatées proprement dites à Radiolaires, et non d'un phosphate en grains comme le précédent et le suivant. Si bien que le régime bathymétrique ne peut se déduire que des caractères de la faune à Radiolaires et de l'absence de tous matériaux apportés de la terre ferme.

Les roches-mères de ces phosphates, ainsi que je l'ai conclu d'une longue analyse, *sont d'anciennes vases à Radiolaires proprement dites d'une pureté qui égale, quand elle ne la dépasse pas, celle des vases similaires actuelles, ne réservant aucune place aux minéraux détritiques et déposées en eau profonde.* Bref, c'est dans un milieu favorable à l'accumulation d'une vase à Radiolaires typiques que les phosphates en question ont pris naissance.

Il importe d'ajouter qu'une conclusion analogue a été formulée par Zb. Sujkowski pour les phosphates du Dinantien de Pologne.

Les données que je possède sur les autres régions de l'Europe où des nodules phosphatés ont été signalés (Angleterre et Fichtelgebirge, I, p. 59) ne me permettent pas de conclure que le régime de la mer dinantienne à phosphates a été le même partout, c'est-à-dire pareil à celui des Pyrénées et de la Montagne-Noire.

Quant aux phosphates valanginiens de Vialka (Russie) dont j'ai fait une *radiolarité en grains, phosphatisée, très glauconieuse, un peu quartzreuse et renfermant des spicules d'Eponges*, ils se réclament, à coup sûr, d'un milieu tout différent, au point de vue bathymétrique, de ceux qui ont engendré les vases à Radiolaires phosphatisées du Dinantien des Pyrénées et de la Montagne-Noire. Cet exemple et d'autres encore nous enseignent que le terme radiolarite n'est pas toujours synonyme de vase à Radiolaires proprement dite.

Phosphates à Diatomées. — La genèse des phosphates à Diatomées comme celle de tous les phosphates en grains implique, ainsi que nous le savons, l'intervention de deux milieux bien distincts : l'un, où les matériaux phosphatés s'élaborent, et l'autre, où ils s'accumulent. En ce qui concerne les craies phosphatées du Bassin de Paris, les deux milieux sont situés dans le domaine même où se dépose la vase crayeuse. Il en résulte que les Foraminifères qui ont contribué à la formation des grains sont charriés par des courants en des points où vivent d'autres Foraminifères nullement minéralisés. En conséquence, les organismes ainsi rassemblés dans la craie phosphatée ne sont pas foncièrement différents. N'empêche qu'on fait le départ des unes et des autres sans nulle difficulté.

Dans le cas des phosphates à Diatomées, l'introduction des grains à Diatomées sur des fonds d'où ces organismes sont complètement exclus crée un contraste profond entre le milieu où s'élaborent les grains et celui où ils s'accumulent.

Je crois avoir complètement démontré que la vase-mère des grains qui ont conservé leurs inclusions organiques, réalise les caractères d'une vase à Diatomées généralement très typique. D'une richesse en carapaces développée au maximum comme c'est le cas dans le Bassin de Gafsa, cette vase se révèle extrêmement fine, complètement exempte de grains de quartz, ce que prouvent les éléments phosphatés élaborés à ses dépens, invariablement privés de représentants de ce minéral à de rares exceptions près, observées dans le sud-ouest du Maroc.

Une foule de matériaux réservent une place qui peut être importante, voire très prépondérante, à un microplankton susceptible d'être très varié. Je signale en particulier des grains à Radiolaires qui sont loin d'être toujours des raretés. Des indices de destruction m'ont conduit à leur attribuer un rôle notable dans les phosphates du Sud-tunisien et dans certains phosphates de l'Atlas. Rares ou clairsemés, ce sont toujours des Radiolaires à caractères pélagiques très accentués. Observons que pas une seule note discordante ne contredit si peu que ce soit l'enseignement qui s'impose. Tout concourt à démontrer que *la vase à Diatomées marines au sein de laquelle les grains phosphatés ont pris naissance, réalise, à un degré qui ne saurait être dépassé, les propriétés d'une vase pélagique de haute mer avec toutes les conséquences qui en découlent au point de vue bathymétrique.*

A la fin de la longue analyse consacrée aux phosphates à Diatomées, j'ai évité délibérément de faire la synthèse des données relatives au second milieu, celui où les grains à Diatomées ont été entraînés et concentrés. Sans doute les descriptions des gisements contiennent-elles des données très probantes à son sujet, mais il manquait à ma documentation une détermination à laquelle, à tort ou à raison, j'attachais une importance exceptionnelle, celle des fameux boudins dont il a été tant de fois question. A la vérité, j'avais nettement l'intuition qu'une solution animale avait toutes chances de prévaloir. Des avis autorisés m'ont confirmé dans cette opinion avec l'appui d'un diagnostic en parfaite harmonie avec les conditions physiques du milieu telles qu'elles découlent de mes descriptions.

Rien n'est plus simple maintenant que de broser le tableau représentatif du milieu où s'accablent les grains de phosphate à Diatomées. On sait que dans tout le domaine correspondant aux phosphates tunisiens, algériens et marocains, les témoignages en faveur d'une sédimentation particulièrement troublée abondent : *rupture d'équilibre à répétition, intervention constante de courants assez forts pour transporter des matériaux de tout volume, principalement en Tunisie où voisinent des poudingues à gros éléments et de volumineux galets isolés dans une formation phosphatée issue d'une vase à Diatomées particulièrement typique, nombreux phénomènes de remaniement, stratification de courants, perforations variées sans oublier la récurrence des horizons phosphatés, susceptibles d'être très nombreux.* C'est à cet ensemble de caractères que vient heureusement s'intégrer l'enseignement fourni par les boudins phosphatés.

6° ENSEIGNEMENTS D'ORDRE GÉNÉRAL, TIRÉS DE L'ÉTUDE DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

J'ai réservé pour la fin de mon étude l'examen ou le rappel d'un certain nombre de questions qui, toutes, revêtent un intérêt général.

DÉPLACEMENT DES FORMATIONS PHOSPHATÉES DANS L'ESPACE AVEC LE TEMPS.

Le coup d'œil jeté au début de la présente étude sur la distribution des phosphates, dans le temps, fait ressortir trois faits essentiels :

1° *Grande pauvreté des formations phosphatées paléozoïques (Dévonien et Permien d'Amérique exclus), eu égard à la durée relative des temps primaires, et à la puissance des sédiments qui en dépendent.*

2° *Diffusion des concentrations phosphatées et leur développement maximum, à la fin du Crétacé et au commencement du Tertiaire.*

3° *Absence de sédimentation phosphatée dans les Océans actuels.*

A cette vue d'ensemble s'en ajoute une autre, non moins instructive, fournie par le déplacement dans l'espace, avec le temps, des gisements les plus importants. Dans le cas des concentrations phosphatées *européo-africaines*, il est possible de dégager les faits suivants :

Les plus anciens phosphates sédimentaires d'Europe datent du Cambrien. Tous sont cantonnés dans le domaine baltique et dénués de valeur.

Au Silurien, les concentrations sont moins rares et, de plus, elles représentent, au total, une masse de phosphate de chaux moins réduite que celle du Cambrien. On les observe principalement dans le Pays de Galles, en Esthonie et en Russie.

Jusqu'à présent, aucun gisement n'est connu en Europe à l'époque dévonienne. Mais au Carbonifère, des phosphates en nodules se développent dans les Pyrénées et dans la Montagne Noire, puis en Angleterre, en Allemagne et en Pologne. Pas une seule concentration actuellement exploitable ne remonte à cette période.

L'époque de surrection et de démantèlement de la chaîne hercynienne s'est révélée défavorable à la genèse des phosphates. Les quelques horizons de nodules, connus dans l'Europe occidentale, ne sont guère autre chose, à une exception près, que des curiosités. Il en va autrement en Russie où la dispersion des phosphates en nodules est immense dans le Jurassique supérieur, et leur plus grande fréquence réalisée dans le Volgien. La Russie centrale a été la principale bénéficiaire de leur développement. Mais, nulle part, celui-ci n'engendre de gisement de valeur comparable à celle des phosphates supracrétacés et éocènes.

Du régime de multiples transgressions, correspondant au Crétacé inférieur, résulte la plus vaste diffusion des nodules phosphatés que l'on connaisse sur le continent européen. Les rognons phosphatés reparaissent à l'état de raretés dans le Néocomien. A l'Aptien, ils se multiplient dans le Bassin de Paris (Boulonnais) tout en gardant un rôle des plus effacés, alors qu'en Angleterre ils ont produit des concentrations jadis exploitées. Leur maximum de dispersion remonte à l'Albien. On les connaît dans une grande partie du Bassin de Paris, où ils ont été mis en valeur pendant plus d'un demi-siècle, puis dans le Bassin du Rhône, en Angleterre, en Suisse, en Allemagne, en Autriche et en Pologne. Dans aucune autre contrée de l'Europe, la transgression des phosphates infracrétacés n'est aussi accentuée qu'en Russie. Développés sur de grandes étendues, ces phosphates jouent un rôle relativement moins important que ceux du Jurassique. Leur position géographique les situe plus au Nord que les phosphates du Bassin parisien. C'est également le cas pour les phosphates jurassiques.

Au Cénomanién, que représentent des nodules épars et de tout petits gisements d'importance négligeable, correspond le maximum de transgression en Russie. Des phosphates de cet âge sont connus en Pologne, et surtout en Russie centrale et méridionale, où ils existent sur de grandes surfaces, à des latitudes qui sont celles de la Grande-Bretagne.

Le Sénonien, qui inaugure, seul, ou avec le Maëstrichtien, la formation des phosphates en grains à grande échelle, a été une période exceptionnellement propice à la formation, à la dispersion et à la concentration des phosphates. De cette époque datent les craies phosphatées du Bassin de Paris, de Belgique, d'Angleterre et de Pologne, une partie des phosphates de Russie, puis ceux des Etats du Levant sous mandat et d'Egypte, sans parler des puissantes accumulations réservées au Maroc. Pour la première fois, la sédimentation phosphatée franchit la Méditerranée et empiète largement sur le continent africain.

A partir du Tertiaire les mers d'Europe cessent d'engendrer des phosphates, lesquels vont désormais se concentrer dans la France d'Outre-Mer. C'est alors que prennent naissance les gisements de Tunisie, d'Algérie et une importante fraction de ceux du Maroc. Le Nummulitique, auquel ils appartiennent, comporte également l'existence de phosphates au Nord et au Sud du Grand Atlas, en Mauritanie, au Sénégal, et selon toutes probabilités au Gabon et au Moyen-Congo. C'est de toutes les périodes celle qui a enregistré le maximum de sédimentation phosphatée, fait d'autant plus digne de remarque que ce maximum met fin au dépôt des phosphates sédimentaires en grains, dans tout le domaine européen-africain.

L'image qui découle de ce coup-d'œil d'ensemble est celle d'une activité qui se déplace avec le temps, en obéissant à la loi suivante : *En gros, les phosphates sédimentaires de l'Europe et de l'Afrique prennent naissance à des distances du pôle d'autant plus grandes qu'ils sont plus récents.* Tout se passe en conséquence comme si le facteur température jouait un rôle décisif dans la genèse des phosphates sédimentaires. Telle serait la raison de leur transgression vers l'équateur au cours des temps géologiques.

C'est le moment de noter que le continent américain ne saurait se prêter à pareille démonstration, par la raison qu'on ne peut faire entrer en ligne de compte actuellement que les phosphates des Etats-Unis, c'est-à-dire d'un domaine plutôt restreint en latitude, en comparaison de l'Europe et de l'Afrique réunies. Toutefois, je souligne cette particularité, non dénuée d'intérêt en l'espèce, que les gisements qui sont de beaucoup les plus puissants, ceux du Permien des Montagnes Rocheuses et ceux du Tertiaire Supérieur de la Caroline du Sud et de la Floride, sont répartis conformément à la loi de distribution dans l'espace, formulée plus haut, c'est-à-dire les plus anciens au Nord et les plus récents au Sud.

RÔLE DES PHÉNOMÈNES D'ÉPIGÉNIE DANS LA FORMATION DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

J'ai signalé naguère le rôle capital joué par le carbonate de chaux dans la fixation de la silice non clastique, en milieu sédimentaire⁽¹⁾. Que cette silice affecte la forme de quartz, de calcédonite,

⁽¹⁾ L. CATEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1929, p. 687-689).

d'opale, etc., jamais elle ne se concentre dans des vides, et, à de très rares exceptions près, elle se substitue à du carbonate de chaux, d'origine organique ou non. La silicification d'innombrables organismes calcaires, la formation des silex par l'intermédiaire de la craie, et des dizaines d'exemples non moins probants, illustrent admirablement le phénomène en question.

Pareil enseignement se dégage, notamment, de l'étude des phosphates de chaux sédimentaires ⁽¹⁾. En fait, la part que prend le carbonate de chaux à la genèse de ces phosphates est des plus importantes. Ce qui est vrai pour la silice l'est également pour le phosphate de chaux qui, lui non plus, ne se précipite jamais dans des vides. Par exemple, les moules phosphatés, engendrés dans les chambres de *Foraminifères*, résultent invariablement d'une substitution à de la vase crayeuse, remplissant les loges avant l'infiltration de la matière phosphatée.

Réserve faite pour les phosphates à *Diatomées* de l'Afrique du Nord, *les nodules et les grains sont phosphatés dans la mesure où ils étaient calcaires à l'origine*. Des témoins du carbonate de chaux converti en phosphate de chaux s'observent dans une minorité de nodules et de grains, presque toujours sous la forme de granules de calcite rongés et, par exception, à l'état de minuscules rhomboèdres. De nombreux éléments, inclus dans les phosphates du Hodna et dans ceux du Sud-Ouest du Maroc, sont particulièrement riches en restes de carbonate de chaux, réalisant les deux manières d'être indiquées.

L'épigénie s'est également manifestée aux dépens de certains organismes calcaires. Le cas des phosphates du Tennessee (Etats-Unis) (I, p. 50), pétris d'articles d'*Echinodermes* minéralisés, est de beaucoup le plus remarquable à cet égard.

Enfin, lorsque dans le phosphate en grains la matière phosphatée envahit la gangue, c'est encore aux dépens du calcaire qu'elle se développe.

De ce bref résumé, il est permis de conclure qu'*une très grande masse de carbonate de chaux a été éliminée, et remplacée par du phosphate de chaux*.

Le tableau qui vient d'être dressé est quelque peu incomplet, en ce sens que l'histoire des phosphates de chaux passés en revue implique également la substitution au calcaire, mais en très faible proportion, de la pyrite et du sulfate de chaux.

Pour justifier la réserve exprimée plus haut, notons que les dépôts nord-africains constituent un groupe à part, du fait que leurs éléments résultent en grande majorité de la phosphatisation, non seulement du calcaire mais de la silice organique, représentée en toute première ligne par des *Diatomées*, accompagnées ou non de *Radiolaires*.

Il s'ensuit qu'à l'exemple de la silice non clastique des roches sédimentaires, le phosphate de chaux est, par excellence, un minéral de substitution. Aussi est-il légitime d'en inférer que le carbonate de chaux, seul ou associé à la silice, est intervenu dans les réactions génératrices des grains, des nodules et du ciment phosphaté.

De cette règle découle un enseignement, susceptible d'être généralisé pour tous les minéraux de substitution de la série sédimentaire : les essais de reproduction à entreprendre, dans le dessin d'éclairer le mode de formation de ces minéraux, doivent l'être en présence de l'élément

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Rôle du carbonate de chaux et des phénomènes d'épigénie dans la genèse des minéraux non détritiques des roches sédimentaires (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXII, 1941, p. 737).

dont ils prennent la place ordinairement sur le fond de la mer, si l'on veut s'inspirer des conditions réalisées en milieu sous-marin, et aboutir à une solution qui soit bien celle du problème posé ⁽¹⁾.

L'élaboration des matériaux phosphatés, telle qu'elle résulte de la présente étude est nettement synonyme d'appauvrissement de certains sédiments, en carbonate de chaux notamment. Il y a, de ce chef, une source d'erreurs dans l'appréciation des teneurs en calcaire des sédiments anciens, dont il n'a pas été tenu compte.

FACTEURS DE LA VARIÉTÉ ET DE L'UNIFORMITÉ DE CARACTÈRE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE DE CHAUX.

La mise en parallèle des gisements de tout âge passés en revue fait ressortir, entre autres particularités d'importance, une diversité de produits phosphatés, réalisant son maximum dès les temps les plus reculés. Cette diversité s'atténue ensuite pour aboutir finalement à une uniformité, d'autant plus grande qu'elle s'étend à la totalité des puissantes formations phosphatées du Nord de l'Afrique.

La comparaison de deux termes extrêmes : d'une part, les phosphates ordoviciens du Pays de Galles, et d'autre part, les phosphates du Maroc, d'Algérie et de Tunisie, est on ne peut plus démonstrative, sous ce rapport. D'un petit gisement du Pays de Galles et d'un nombre fort restreint de matériaux, j'ai extrait maintes variétés, sans avoir la certitude de les posséder en totalité. Tout compte fait, cette variété repose sur des différences minéralogiques et organiques, les unes et les autres très tranchées.

Presque à l'autre bout de l'échelle chronologique des phosphates, se trouvent des dépôts uniformément composés de grains, souvent pétris de microplankton, dont les différences de caractères ne sont, au fond, que des nuances. Qu'importe, au point de vue du milieu générateur, que les éléments soient plus ou moins imprégnés d'hydrocarbures, ou plus ou moins solidement agrégés? A la vérité, il n'y a de traits différentiels marqués que dans la nature de la gangue, ici, calcaire, et là, marneuse ou absente. Un contraste profond entre les deux termes extrêmes en est la conséquence.

Rien n'est plus facile que d'intercaler entre les deux types choisis des éléments de démonstration non moins probants. Nos gisements jurassiques, complètement dénués d'intérêt pratique, se réclament d'une grande variété de phosphates. C'est le cas, également, pour les petits gisements albiens, dispersés un peu partout en France et ailleurs, lesquels trahissent une très grande variabilité de constitution. Celle-ci disparaît dès qu'on arrive aux phosphates sénoniens du Bassin de Paris, tous pareils à eux-mêmes.

Tout bien considéré, la grande variété de caractères est l'attribut des petits gisements, et l'uniformité, l'apanage des grands. Cette règle peut se traduire en disant que l'uniformité se réclame de la condition

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Rôle du carbonate de chaux et des phénomènes d'épigénie dans la genèse des minéraux non détritiques des roches sédimentaires (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXII, 1941, p. 739).

pélagique, et la variété, des milieux terrigènes. Ainsi exprimée, la règle s'explique, pour ainsi dire d'elle-même.

RÔLE PRÉPONDÉRANT DES ACTIVITÉS SOUS-MARINES DANS L'ÉLABORATION DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

Plus les progrès dans la connaissance des dépôts sédimentaires se multiplient et s'affermissent. et plus le milieu sous-marin paraît jouer un rôle capital dans leur histoire. Et cela est vrai, en particulier, dans le domaine des phosphates, où son influence est manifestement très prédominante, sinon exclusive.

Quand une vase crayeuse touche au fond de la mer pour engendrer de la craie, le maximum des transformations qu'elle est appelée à subir consiste en une faible consolidation et une migration partielle ou totale de la silice organique pour se concentrer en silex. A la lumière de ce que nous savons aujourd'hui, ces modifications sont réalisées avant qu'intervienne l'émersion.

Dans le cas des phosphates en grains l'histoire du dépôt se complique singulièrement, tout en restant tributaire d'un bout à l'autre du milieu sous-marin. La genèse même des grains se fait dans un domaine qui n'est pas celui où ils se rassemblent. C'est là que par un double et parfois un triple processus, il se forme des éléments phosphatés, soit par simple épigénie du carbonate de chaux, soit par épigénie et concrétionnement du phosphate qui prend la place du calcaire. Tel est le cas général. Il arrive, et le fait est très répandu dans les craies phosphatées du Nord de la France, qu'un troisième processus intervienne, en donnant naissance, en milieu marin également, à une couronne de phosphate cristallin d'origine non épigénique. Après quoi ces matériaux sont transportés et concentrés dans un milieu soumis à une dynamique spéciale qui se manifeste au large, où elle crée des conditions bathymétriques rappelant celles qui sont réalisées normalement à proximité des côtes. A son défaut la sédimentation est tarie dans sa source. Et lors de la mise en place des matériaux, il arrive qu'un supplément de phosphate, fixé par l'intermédiaire d'une gangue calcaire, s'ajoute à la masse principale individualisée sous forme de grains.

S'il existe des organismes siliceux dans les vases converties en grains, comme c'est le cas pour les roches-mères des phosphates nord-africains, ils subissent le sort des spicules d'Eponges de la craie, en fournissant la matière de silex, élaborés sous la mer.

Dans une pareille succession d'événements, qu'y a-t-il à rapporter à des activités qui ne soient pas sous-marines? Rien. Tout au plus peut-on émettre l'hypothèse que la consolidation des dépôts, d'origine indubitablement sous-marine, lorsqu'on peut réunir les éléments d'une démonstration, a été complétée pendant et après l'émersion. A l'appui de cette conjecture, il m'est impossible d'invoquer le moindre indice.

Bref, j'estime que *les phosphates en grains sont sortis du fond de la mer, tels que nous les voyons aujourd'hui, quand ils sont soustraits aux influences météoriques.*

Une démonstration non moins probante peut être demandée aux minerais de fer oolithique bien que leur histoire s'étoffe d'une évolution minéralogique très compliquée.

Et me voici conduit à formuler, une fois de plus, la conclusion que *les milieux sous-marins ont profondément marqué leur empreinte sur l'histoire des roches sédimentaires.*

L'histoire des phosphates de chaux sédimentaires et celle des minerais de fer oolithique sont étroitement apparentées, mais différentes sur plus d'un point fondamental.

PARALLÈLE ENTRE L'HISTOIRE DES PHOSPHATES DE CHAUX EN GRAINS ET CELLES DES MINERAIS DE FER OOLITHIQUE.

1° La question de l'origine première, tant du fer que du phosphore des formations sédimentaires, est une de celles qui sont résolues d'avance, ainsi que je l'ai noté plusieurs fois. Il n'en va pas de même du mécanisme de la fixation et de la concentration de ces deux éléments pour former de véritables gisements. Un grand pas semble avoir été fait dans la voie de la solution par la découverte de nombreuses bactéries, tant dans les milieux phosphatés que dans les minerais de fer oolithique. De ce chef, l'histoire des deux groupes de dépôts compte un trait d'union d'importance.

2° Soulignons le fait capital que la sédimentation phosphatée, ainsi que la sédimentation ferrugineuse sont inconnues de nos jours, et que toutes deux ont été très intermittentes. Cette discontinuité même pose un grand problème qui a, maintes fois, retenu notre attention. Sous quelle influence les deux sédimentations entrent-elles en jeu à certains moments de l'histoire de la terre ?

3° Le mécanisme même de la formation des gisements de minerai de fer oolithique et de phosphate de chaux en grains comporte une succession d'épisodes, qui sont rigoureusement les mêmes de part et d'autre :

A. Rupture d'équilibre inaugurant la sédimentation ferrugineuse et phosphatée.

B. Intervention de deux milieux générateurs, l'un, où s'élaborent les grains ferrugineux ou phosphatés; l'autre, où ils s'accumulent. Et, par conséquent, formation en deux temps foncièrement distincts.

Le second temps, qui est celui de la mise en place définitive des matériaux, implique pour les minerais de fer oolithique un enrichissement des plus sensibles, par suite de la minéralisation partielle ou totale du ciment. Dans la majorité des cas, la gangue des phosphates de chaux est exempte de minéralisation; et il est rare qu'elle soit suffisamment phosphatée pour qu'on n'ait pas intérêt à l'éliminer.

4° L'enchaînement des événements qui ont abouti à la formation des oolithes ferrugineuses et des grains phosphatés comporte un épisode qui est rigoureusement le même de part et d'autre. Au cours de leur évolution minéralogique, les oolithes ferrugineuses franchissent un stade calcaire. Il en va pareillement pour les grains phosphatés, lesquels ont été plus ou moins calcaires dès le principe. En sorte que les phénomènes d'épigénie tiennent une grande place dans l'histoire des deux catégories de dépôts.

5° Il est un dernier trait commun aux deux substances, je veux parler de leur aptitude à se concrétionner, qui est loin d'être la même de part et d'autre. Elle aboutit à la genèse d'innombrables oolithes typiques dans les minerais de fer. Simplement amorcée dans une foule de grains phosphatés, la structure concrétionnée fait complètement défaut dans la grande majorité des éléments. Font exception, sous ce rapport, les craies phosphatées, telles que celles du Bassin de Paris, qui sont à base d'oolithes proprement dites.

6° Les produits de la sédimentation ferrugineuse et phosphatée diffèrent par leur stabilité. Ceux de la sédimentation ferrugineuse se prêtent à une évolution minéralogique compliquée, dont le terme ultime varie, suivant les gisements, voire même en des points extrêmement rapprochés d'un même gîte, si bien que le faciès et la composition des minerais sont sujets à de très grandes variations. Tel n'est pas le cas pour les phosphates de chaux, lesquels réalisent d'emblée un état stable, le même, à des nuances près, pour les produits de tout âge.

7° Sur un point de grande portée, les deux groupes de dépôts obéissent à des règles diamétralement opposées. Les minerais de fer sédimentaires, y compris les variétés oolithiques que j'ai spécialement en vue ici, constituent dans leur ensemble des gîtes d'autant plus importants qu'ils sont plus anciens. Le contraire existe pour les phosphates de chaux sédimentaires, dont les gisements les plus développés sont les plus récents. Autrement dit, la *sédimentation ferrugineuse débute par son maximum*, et la *sédimentation phosphatée prend fin en réalisant le sien*.

8° La distribution dans le temps et dans l'espace des minerais de fer oolithique a fait ressortir l'existence d'un lien de cause à effet entre la démolition des chaînes de montagnes successives et la genèse de ces minerais⁽¹⁾. Le phénomène d'inversion qui vient d'être signalé dans la concentration avec le temps des minerais de fer oolithique et des phosphates de chaux démontre que la mise en liberté d'une grande quantité d'acide phosphorique, consécutive à la démolition des chaînes paléozoïques d'Europe, ne s'est pas traduite par la genèse d'importants gisements de phosphate. A elle seule, l'existence du maximum, correspondant aux gisements nord-africains, plaide contre toute idée de lien, direct ou non, entre la sédimentation phosphatée et le démantèlement des chaînes de montagnes.

Pour conclure, notons que réduits aux données essentielles, les éléments de l'analyse comparée des phosphates de chaux en grains et des minerais de fer oolithique mettent en évidence des liens de parenté, d'ordre génétique, qui l'emportent et de beaucoup, sur les différences.

PHÉNOMÈNES DE CONVERGENCE DANS LE DOMAINE DES PHOSPHATES DE CHAUX.

L'étude des gisements de craie phosphatée à *B. quadrata* du Nord de la France a fait ressortir l'existence de multiples variétés de brèches, développées aux dépens d'une seule et même formation phosphatée, que je crois devoir rappeler à cette place, en raison du caractère tout à fait

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les minerais de fer oolithique de France. II. Minerais de fer secondaires (*Ét. Gîtes min. France*, 1922, p. 947).

exceptionnel des phénomènes de convergence qu'elles accusent. Il s'agit, en effet, de la coexistence de cinq types de brèches, répondant à cinq processus différents ⁽¹⁾ :

1° Brèche sédimentaire typique, constituée par des fragments anguleux de craie blanche, remaniés dans une craie phosphatée.

2° Brèche résultant d'une phosphatisation capricieuse du mur, isolant des témoins de craie blanche de forme anguleuse.

3° Brèche engendrée par une corrosion du mur, permettant à la craie phosphatée de s'introduire entre des morceaux de craie blanche, épargnés par le phénomène.

4° Structure bréchoïde, déterminée par l'enchevêtrement de grandes perforations (boudins phosphatés), respectant une série de témoins anguleux de craie blanche;

5° Brèche développée, sous l'influence d'une préparation mécanique, isolant en pleine craie blanche, des nids de craie phosphatée, de forme plus ou moins anguleuse.

Tout bien pesé, de pareilles brèches sont tour à tour, d'origine *dynamique, chimique et organique*. Et les unes datent de la sédimentation même, alors que les autres lui sont postérieures.

On voit par cet exemple combien la question des brèches peut être complexe dans un domaine qui échappe complètement aux phénomènes tectoniques.

A tort ou à raison, j'y vois une raison de plus pour réviser la question des brèches, dites tectoniques, dont l'étude est loin d'avoir reçu toute l'attention requise.

CONSIDÉRATIONS SUR LE PROBLÈME PALÉOGÉOGRAPHIQUE POSÉ PAR LES GRAINS DE QUARTZ, DE PHOSPHATE ET DE GLAUCONIE.

Les conditions qui président à la formation des gisements de phosphate en grains sont loin de mettre sur le même plan le quartz détritique et l'élément phosphaté, au point de vue des enseignements qu'on en peut tirer, sous le rapport paléogéographique.

La raison en est que les grains de quartz et ceux de phosphate interviennent, en toute indépendance, dans la constitution des sédiments phosphatés. La distribution des premiers obéit à une dynamique générale, qui est la même pour tous les matériaux issus de la terre ferme. Celle des seconds est fonction d'une dynamique régionale, dont l'action est soumise à des intermittences, et qui a son point de départ, en pleine mer, dans les ruptures d'équilibre, tant de fois mises en cause dans les pages précédentes. De cette différence fondamentale découle un enseignement à ne jamais perdre de vue, dans l'interprétation des phosphates de chaux en grains. Qu'ils soient ou non individualisés en petits éléments; qu'ils soient ou non entremêlés de produits conglomérés, les dimensions de leurs matériaux ne nous renseignent en rien sur l'éloignement des rivages, parce qu'elles sont réglées par des facteurs propres au milieu générateur des gisements. Tout au contraire, les grains de quartz qui figurent dans les dépôts phosphatés, enregistrent par des variations de taille et de fréquence les changements qui surviennent dans les rapports des fonds sous-marins avec la terre ferme.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Structure bréchoïde des craies phosphatées du Nord de la France et ses multiples origines (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCVI, p. 392-394).

A supposer que la notion de perturbation génératrice des gisements de phosphate soit inconnue de l'observateur, il est des faits qui imposent à son esprit l'idée d'un régime aberrant. Par exemple, il constate qu'en passant d'un substratum d'origine pélagique à un phosphate grossier, le quartz détritique n'a changé, ni de volume, ni de fréquence, ou bien, il reconnaît qu'un phosphate extrêmement grossier n'a rien reçu de la côte. Tout l'orienté peu à peu vers la conclusion qu'il existait dans les mers anciennes des domaines jouissant d'une grande autonomie, bien que situés en pleine mer, et susceptibles de se singulariser, quant à la nature des sédiments qui leur sont réservés.

Un pareil contraste dans la signification des deux produits tient au fait que les grains de phosphate revêtent tous une dualité de caractères très prononcée. Ce sont des matériaux, toujours remaniés, assimilables, en un certain sens aux minéraux clastiques. Mais à la différence des grains de quartz, le point de départ de leurs évolutions sous-marines est étranger à la terre ferme. C'est pourquoi on en doit faire abstraction dans l'appréciation des distances à la côte des centres d'accumulation des grains. En d'autres termes, ils ne sont d'aucune utilité au point de vue paléogéographique.

Un enseignement, en tous points semblable au précédent, découle de l'histoire comparée du quartz clastique et des grains de glauconie. Si l'on voulait déduire des modifications de volume de ceux-ci les variations de distance à la côte, on s'exposerait à de graves mécomptes. Que de fois, on observe des éléments glauconieux, nombreux et très gros, en compagnie de tout petits grains de quartz des plus clairsemés. De même que les matériaux phosphatés, ils prennent naissance sous la mer, et sont entraînés plus ou moins loin de leur point de départ. En quoi, ils n'enregistrent pas nécessairement les modifications survenues du côté de la terre ferme, comme le font les matériaux terrigènes.

Disons en manière de conclusion, que le caractère grossier d'un phosphate en grains ou des matériaux glauconieux ne suffit pas, à lui seul, pour impliquer la proximité d'une terre ferme.

LE PROBLÈME DE LA FORMATION DES SILEX EN MILIEU PHOSPHATÉ.

On peut dire, en toute vérité, que l'étude des phosphates de chaux de Tunisie et de l'Extrême-Est algérien ouvre un nouveau chapitre dans l'histoire des silex. Pendant longtemps, le groupe des *Spongiaires* a été considéré comme l'unique source, ou peu s'en faut, de la silice concentrée en silex. Cette notion reste l'expression de la vérité pour les silex de la craie qui sont tous redevables de leur silice aux spicules d'Éponges. *A priori*, il était naturel de supposer que les *Diatomées* et les *Radiolaires*, susceptibles d'engendrer de puissantes accumulations de valves et de coquilles, avaient dû subir le sort de beaucoup de spicules d'Éponges, et donner naissance à des accidents siliceux plus ou moins comparables aux silex. Pendant longtemps, le contraire a été tenu pour la règle. Si bien que de l'étude systématique des roches siliceuses, j'ai conclu, en 1929 : « A première vue, les diatomites ne sont jamais le point de départ de phénomènes de concentration de la silice, comme les roches à spicules d'Éponges ⁽¹⁾ ».

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte. Géol. France*, 1929, p. 393).

L'analyse des phosphates de l'Afrique du Nord a profondément modifié nos connaissances en la matière.

Intervention des trois groupes d'organismes siliceux dans la constitution des phosphates sédimentaires. D'une manière générale, les sources de la silice nécessaire pour élaborer des concentrations siliceuses, rentrant ou non dans la catégorie des silex typiques, sont au nombre de trois principales : les *Spongiaires*, les *Radiolaires* et les *Diatomées*. Des représentants de ces trois groupes participent à la constitution des phosphates, mais en jouant des rôles extrêmement différents.

Pour des raisons inconnues, celui des *Spongiaires* est presque complètement exclu des phosphates en grains. Son absence est surtout frappante dans les phosphates nord-africains, où elle est absolue dans la presque totalité des nombreux échantillons analysés. Il s'ensuit que les spicules d'Éponges sont restés étrangers à la formation des concentrations siliceuses des phosphates de Tunisie, d'Algérie et du Maroc⁽¹⁾. Par contre, ils prennent part à la constitution de nombreux nodules-galets, mais sans jamais donner naissance à des concentrations rappelant plus ou moins les silex.

Les *Radiolaires* ont été pour certains phosphates une source de silice extrêmement importante. On n'a pas oublié le rôle capital qu'ils ont joué dans la formation des phosphates carbonifères des Pyrénées, de la Montagne-Noire et de la Pologne, puis dans ceux de l'Infracrétacé de Russie. Aucune concentration siliceuse apparentée aux silex n'en dérive. On sait qu'il font cortège aux *Diatomées*, en jouant un rôle d'arrière-plan dans les phosphates nord-africains. Il y a de sérieuses raisons de croire qu'ils ont ajouté un peu de silice à celle des *Diatomées* pour engendrer les produits siliceux dont il va être question.

N'étaient les *Diatomées* signalées dans l'Albien de Russie que toutes celles qui interviennent dans la constitution des phosphates appartiendraient aux gisements du Nord de l'Afrique. C'est grâce à elles que nos connaissances sur les silex ont progressé au cours de la présente étude.

Les Diatomées, source de la silice des silex des phosphates de l'Afrique du Nord⁽¹⁾. De l'analyse des phosphates nord-africains on peut conclure qu'une réserve considérable de silice organique, la plus grande, en vérité, que l'on connaisse à présent, dans la série sédimentaire ancienne, a été accumulée, sous la forme de *Diatomées*, dans les dépôts convertis en phosphates. Or, règle générale, le mécanisme de phosphatisation des vases à *Diatomées* comporte l'élimination de la quasi totalité de la silice, c'est-à-dire de quoi élaborer une infinité de silex, dans l'hypothèse, où cette silice s'est fixée dans les formations phosphatées. En conséquence, s'il existe des silex dans les phosphates et les stériles qui leur sont subordonnés, ce qui est précisément le cas, on est fondé à chercher l'origine de leur silice dans celle des *Diatomées*. Cette orientation s'impose d'autant plus que les spicules d'Éponges, ainsi que nous le savons déjà, sont exclus des dépôts phosphatés dans des conditions telles qu'ils n'existaient certainement pas en nombre, à l'origine, en compagnie des *Diatomées*.

⁽¹⁾ Cette formule vise les phosphates proprement dits, compte non tenu des roches stériles qui les accompagnent. S'il était question de celles-ci, il serait nécessaire de signaler l'existence de spicules d'Éponges dans les dépôts associés aux phosphates des Ganutour et de les faire participer à la formation des silex qu'ils renferment.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Considérations sur la silice et les silex des phosphates à *Diatomées* de l'Afrique du Nord (*C. R. Ac. Sc.*, t. 211, 1940, p. 169-172).

De tout cela il est permis de conclure à l'existence dans le Nord africain de concentrations siliceuses, d'origine aberrante en l'état de nos connaissances, en ce que les organismes générateurs de leur silice sont des Algues marines, et non des Spongiaires. Pour le moment, l'exemple est unique, mais il intéresse un domaine immense et d'innombrables silex.

Dans les développements qui vont suivre je rappellerai brièvement les caractères des concentrations de la silice : 1° dans les stériles calcaires de la formation phosphatée; 2° dans les stériles dolomitiques (Hodna); 3° et dans les phosphates.

1° SILEX DES STÉRILES CALCAIRES.

A. Les données les plus intéressantes, en ce qui les concerne, ont été fournies par les formations phosphatées de la Tunisie centrale et, plus particulièrement de Rebiba. Nul dépôt n'est aussi instructif pour l'histoire des silex que les calcaires intercalés entre les deux couches phosphatées de ce gisement (II, p. 401 et fig. 32, texte A). Les faits sont tels que dans ces calcaires, d'une épaisseur réduite à 0 m. 30-0 m. 35, *des rognons de silex ont été engendrés, puis extraits de leur gangue, remaniés et perforés au fond de la mer.* Et pour parfaire la démonstration *une limite d'âge est assigné à tous les silex subordonnés au calcaire intercalaire, par l'inclusion, à la base même du phosphate qui le surmonte, de galets de silex perforés qui lui sont tous empruntés.* Ce même horizon calcaire retient encore l'attention par des silex formés en deux temps, dans de telles conditions que, seules, les parties attribuables au premier temps ont été perforées. Dans toutes leurs manières d'être, les perforations des silex en question présentent un vif intérêt.

Les silex des stériles calcaires sont parfaitement individualisés comme ceux de la craie, mais ils en diffèrent par des caractères externes et internes, qui se ramènent à deux principaux : *a.* la couleur en est différente et, partant, la composition l'est également; *b.* hormis ceux du Bassin des Ganttour au Maroc, tous sont privés de patine.

a. Les différences de coloration tiennent à l'inclusion de matières diverses, telles que calcaire et hydrocarbures. L'existence d'un abondant résidu de carbonate de chaux, cristallisé en petits rhomboèdres, est une des caractéristiques des silex en question; c'est elle qui imprime une teinte jaune chamois aux silex des calcaires intercalaires de Rebiba. Celle d'hydrocarbures leur communique une coloration noirâtre, comme dans le gisement de Kalaat-es-Senam.

b. Quant à l'absence de la patine, elle ne souffre pas une seule exception dans les Bassins phosphatés de Tunisie, d'Algérie et des Ouled Abdoun au Maroc, en quoi le faciès des silex, issus des vases à Diatomées, diffère foncièrement de celui des silex de la craie. Il en va autrement dans le Bassin des Ganttour, comme si l'intervention des Spongiaires jouait un rôle dans la genèse des patines, ce qui ne se conçoit pas du tout.

Abstraction faite de ces dissemblances, la parenté des deux types est on ne peut plus étroite, c'est dire que les silex des stériles calcaires sont constitués par une calcédonite cryptocristalline, à laquelle s'associe ou non de la calcite en proportion très variable.

B. Le gisement du Kouif (Constantine) m'a fourni des concentrations siliceuses de type très aberrant et de signification inconnue. Au calcaire qui sépare les couches III et II (II, p. 418, F),

est subordonné un cordon de silex géodiques en rognons, dont les cavités sont généralement tapissées par une belle calcédonite mamelonnée. Sur le même plan on peut observer, outre les silex proprement dits, des géodes calcaires, d'autres quartzieuses, et des noyaux de quartz, susceptibles de dépasser la taille du poing. J'ignore si ces productions siliceuses ont pris naissance en même temps que les silex typiques de la formation, c'est-à-dire sous la mer.

C. Une des particularités que revêtent les silex des stériles calcaires est de réaliser des types très différents en des points très rapprochés d'un même horizon dans un gisement donné. A titre d'exemple, je rappellerai celui du calcaire intercalé entre les couches III et II du Kouif (II, p. 418), lequel renferme, à la base, des silex noirs, et, à 0 m. 25 au-dessus, un cordon de silex géodiques, nullement apparentés aux précédents.

Sous le rapport génétique, c'est un fait hors de conteste que *ces changements de faciès sont liés à d'importantes variations dans les conditions du milieu sous-marin*. On en peut légitimement inférer que ces variations ne sont pas étrangères à la formation des silex en question et, partant, que *ceux-ci ont pris naissance sur le fond de la mer, ou peut s'en faut, et non pendant l'émergence ou plus tard*. Ce dernier enseignement est en tous points conforme à ce que nous avons appris en étudiant les silex de la craie du Bassin de Paris.

D. Les silex des stériles calcaires du Bassin des Ganntour se signalent par deux particularités qu'il est utile de rappeler ici.

a. On sait qu'à la différence des silex des autres bassins phosphatés du Nord de l'Afrique ceux des Ganntour se singularisent par l'existence d'une patine et que celle-ci contient une trame calcaire parfois très développée. Cette trame offre tous les caractères d'un résidu qui a échappé à la silicification, lors de la formation des silex. Sa présence prouve à l'évidence, une fois de plus, que la patine est tout autre chose qu'un produit d'altération des silex. La conclusion formulée, naguère, qu'elle représente un dernier stade de la croissance des silex lui est applicable sans nulle réserve⁽¹⁾.

b. La règle, non absolue, que la formation des silex suit de près la chute des sédiments sur le fond de la mer comporte une très curieuse exception à proximité du carreau de la mine L. Gentil. On y peut voir de volumineux amas de silex refoulant les strates qui les recouvrent. Très rares sont les exemples qui illustrent cette manière d'être.

2° SILEX DES STÉRILES DOLOMITIQUES.

Les phosphates, qui prolongent ceux de la Tunisie centrale dans le massif du Hodna (Constantine), comportent l'existence de stériles dolomitiques renfermant également des silex. L'étude de ceux-ci projette une vive lumière sur le problème du milieu générateur des silex, en même temps qu'elle précise à nouveau un point important de l'histoire des Dolomies.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1929, p. 455-463).

Dans le domaine de M'Zaïta, par exemple, il existe au mur du «banc constant» (II, p. 532 et 538); 3 mètres de dolomie, riche en silex, constituant, à eux seuls, jusqu'à la moitié de l'horizon. Des dolomies à silex existent encore à d'autres niveaux, et il en va de même dans les autres gisements de la région.

Au microscope, ces dolomies se résolvent en rhomboèdres, grains subrhomboédriques et éléments irréguliers, plongés dans une trame de *calcite* très peu développée. Quant aux silex, qui s'y trouvent inclus, ils renferment quantité de rhomboèdres, non de dolomite mais de calcite, et il en est parmi eux qui sont plus calcaires que siliceux. De cette constitution, répondant à une règle absolue, découlent deux premiers enseignements ⁽¹⁾.

A. *Les silex en question se sont développés en milieu calcaire — et non en milieu dolomitique.*

B. *Les dolomies, associées au phosphate de chaux, sont d'origine épigénique, et leur genèse est postérieure à la formation des silex.*

La dolomie à silex, située au mur du «banc constant» de M'Zaïta est interrompue par une intercalation sporadique de poudingue phosphaté, renfermant des galets de silex. Certains de ces galets, d'un type bien défini, ont été empruntés à des silex en place, situés à 0 m. 20, 0 m. 15 et parfois 0 m. 10 au-dessous du niveau qu'ils occupent. D'autre part, il existe à la base du «banc constant» du phosphate congloméré, renfermant de petits galets de dolomie, tous extraits du mur dolomitique de la couche. Il en résulte que :

C. *La genèse des silex, subordonnés aux calcaires transformés en dolomies, et les phénomènes de dolomitisation suivent de très près le dépôt des calcaires.*

D. *Non seulement les silex et la dolomie qui les renferme sont d'origine sous-marine, mais leur remaniement, pour engendrer des galets, est lui-même un phénomène sous-marin.*

A ce sujet, il est opportun de rappeler que l'analyse des accidents magnésiens et siliceux de la craie du Bassin de Paris et du calcaire carbonifère du Nord de la France et de la Belgique avait déjà fourni les éléments d'une démonstration analogue et non moins probante ⁽²⁾.

Un dernier enseignement, celui-ci étranger au problème de l'origine des dolomies, peut être formulé dans les termes suivants :

E. *Les silex des stériles dolomitiques, comme ceux des stériles calcaires, sont invariablement privés de patine.*

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Dolomies et silex de la formation phosphatée suessonienne du Hodna (Constantine) [*C. R. Ac. Sc.*, t. CCVIII, 1939, p. 1541-1543].

⁽²⁾ L. CAYEUX. — L'âge relatif des silex et des dolomies de la craie du Bassin de Paris (*C. R. Ac. Sc.*, t. LXXX, 1925, p. 1354-1356).

Ibid. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1928, p. 480-485 et 539).

Ibid. — L'âge relatif des phanites et dolomies du calcaire carbonifère du Nord de la France et de la Belgique (*C. R. Ac. Sc.*, t. LXXX, 1925, p. 843-846).

Ibid. — Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées. Calcaires et dolomies, 1935, p. 433-434.

3° LES CONCENTRATIONS SILICEUSES EN MILIEU PHOSPHATÉ.

Elles affectent deux manières d'être : l'une, indiscernable à l'œil nu, et l'autre qui se révèle à nos sens par des accidents siliceux de toute importance.

A. J'ai déjà analysé la première en étudiant les variations de composition de la gangue. D'une façon générale, la silice intervient dans la constitution du ciment, sous la forme de calcédonite cryptocristalline, identique à celle des silex, et, par exception, à l'état d'opale plus ou moins globulaire, ou indifférenciée.

D'une autre différenciation résulte une structure réticulée, généralisée, très nette, dont les mailles, constituées par de l'opale, mesurent, en moyenne, 5-6 μ d'ouverture. A ma connaissance, elle n'a été observée, jusqu'à présent, que dans la couche II de Metlaoui, où elle est d'ailleurs reléguée au rang d'exception⁽¹⁾.

Dans tous les cas, cette silice prend la place d'un ciment calcaire; sans jamais se fixer dans des vides. Sous ce faciès, le rôle de la silice est généralement des plus accessoires.

B. Tout silex, développé en milieu phosphaté, contient de nombreux grains. Règle générale, il est impossible de l'extraire de sa gangue sans qu'il entraîne avec lui une certaine quantité de phosphate. C'est dire qu'il est imparfaitement individualisé, en quoi il représente une variante du silex typique.

Lorsqu'on étudie les silex de la craie, il est de règle que la raison de leur emplacement et de leur ordonnance en cordons ou en lits parallèles reste indéterminée. D'ordinaire, on esquivait la difficulté en disant que cette ordonnance est la conséquence de la distribution et de la concentration des spicules sur le fond de la mer. S'il en est ainsi la place des silex est fixée d'avance. Pour ma part, je n'ai jamais pu m'assurer que cette interprétation était quelque peu fondée. Dans le cas des phosphates à Diatomées, pareille explication ne peut être prise en considération, dès l'instant que les carapaces de Diatomées abondent, pour ainsi dire, en tous points. En l'espèce, la distribution des silex obéit à une règle très précise : la concentration de la silice s'effectue de préférence dans les parties d'une couche, composée de grains phosphatés espacés au maximum, comme si un minimum d'écartement des éléments, soudés par du carbonate de chaux, était une condition requise pour la fixation de la silice en grande masse. Et comme la gangue calcaire ne peut qu'être originelle — lorsque les grains phosphatés ne sont pas juxtaposés — il s'ensuit que *l'emplacement des futurs silex a été marqué sur le fond de la mer par une concentration exceptionnelle de la vase calcaire, génératrice du ciment des phosphates plus ou moins consolidés.*

Dans le cas spécial des phosphates meubles, qui est celui d'une partie des phosphates du Bassin des Ouled-Abdoun au Maroc, la silice ne se précipitant jamais dans des vides, il n'y a de silex que là où la sédimentation a concentré un peu de vase calcaire, sous l'influence d'un phénomène de préparation mécanique. La preuve en est que les silex développés dans un sable phosphaté

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Structure réticulée de la silice observée dans des phthanites précambriens et des phosphates suessoniens (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCIII, 1936, p. 6.

Ibid. — Les phosphates de chaux sédimentaires de France (France métropolitaine et d'outre-mer), t. II, 1941, p. 458.

privé de ciment originel, et dont les grains se touchent nécessairement, sont toujours caractérisés par l'existence de grains isolés de toutes parts. Les parties converties en silex correspondent rigoureusement à celles qui, par exception, étaient pourvues d'une gangue calcaire originelle. Lorsque le sable phosphaté fait place, latéralement et brusquement, par une sorte de prise en masse généralisée, à des phosphates très cohérents à ciment calcaire, les silex qu'on y observe s'ordonnent rigoureusement sur le même plan que ceux des sables phosphatés. De part et d'autre, les grains de phosphate sont isolés dans leur ciment siliceux.

En résumé, qu'il s'agisse de phosphate cohérent ou de phosphate meuble, la règle est la même. Dans les deux cas, *l'emplacement des silex a été arrêté sur le fond de la mer, au cours de la sédimentation, si bien qu'il y a prédestination très nette des horizons, correspondant aux futurs alignements des silex* ⁽¹⁾.

On ne manquera pas d'observer, à cet égard, qu'en milieu phosphaté comme en milieu calcaire, les silex résultent d'une épigénie du carbonate de chaux par la silice, si bien que *dans le cas des silex développés en plein phosphate, les nodules sont siliceux dans la mesure où le phosphate était calcarifère, au moment de la sédimentation.*

L'exemple qui vient d'être analysé est le seul, à ma connaissance, qui permette de raisonner l'emplacement des concentrations siliceuses, sans faire appel à l'hypothèse. En l'espèce, toute recherche en vue de découvrir la source de la silice est sans objet, dès l'instant que celle-ci est connue d'avance.

Il est clair que le problème se pose tout autrement dans un milieu foncièrement calcaire comme celui de la craie, et que la distribution des concentrations siliceuses, sous forme de silex, doit obéir à une règle toute autre. Dans l'étude des roches siliceuses, j'ai émis l'opinion que l'intervention de perturbations n'y est peut-être pas étrangère. Une telle hypothèse s'inspire de l'extrême abondance des silex dans la région d'Étretat, où l'on constate, à certains niveaux, une liaison des plus intimes entre cette fréquence exceptionnelle et d'incessantes ruptures d'équilibre. « *Tout y trahit, ai-je dit, une instabilité de régime poussée à l'extrême, qui a profondément marqué son empreinte sur la distribution des silex* » ⁽²⁾. Et j'ai ajouté que l'ordonnance de beaucoup de silex de la craie, en cordons d'allure rythmée, se rattache probablement à un problème plus général que celui des silex, à savoir la division en bancs, conséquence de la récurrence plus ou moins régulière d'un trouble jeté momentanément dans la sédimentation.

Rôle des silex de la formation phosphatée dans la conservation des hydrocarbures. — J'ai trop insisté, chemin faisant, sur cette question pour qu'il soit utile de la reprendre *ab ovo*. Il suffit de rappeler ici, que dans un phosphate imprégné d'hydrocarbures les grains phosphatés, inclus dans les silex, sont beaucoup plus chargés d'hydrocarbures que les autres. De plus, dans les phosphates qui ne révèlent l'existence d'hydrocarbures que par l'odeur dégagée, sous l'influence d'actions mécaniques, les silex peuvent renfermer des grains qui s'en montrent largement pourvus sous le microscope. Cette différence, entre les grains engagés dans les silex et les autres est due à trois causes : 1° élaboration des hydrocarbures sur le fond de la mer par décomposition des matières organiques ; 2° genèse des silex sous la mer ; 3° difficulté d'élimination des gaz inclus en milieu siliceux.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Considérations sur la silice et les silex des phosphates à Diatomées de l'Afrique du Nord (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXI, 1940, p. 169-172).

⁽²⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1922, p. 573-574).

Tout bien pesé, cette différence si tranchée fournit un témoignage en faveur de la genèse des silex en milieu sous-marin.

Patine des silex. — L'analyse des silex de la craie du Bassin de Paris permet de démontrer que la patine date de l'origine même des silex⁽¹⁾, et qu'elle correspond à la dernière phase de leur développement, dans des conditions de milieu que j'ai supposées en voie de changement. Ce qui revient à dire que la patine est d'origine sous-marine, et nullement un produit engendré sous l'influence d'agents météoriques.

L'étude des phosphates nord-africains contribue à éclairer ce point de l'histoire générale des silex. Une première donnée est fournie par les silex des formations phosphatées de Tunisie, d'Algérie et du Bassin des Ouled Abdoun au Maroc, lesquels sont tous privés de patine. Or, les matériaux que j'en ai prélevés font partie, en totalité, d'affleurements ou de dépôts situés au voisinage de la surface et, par conséquent, soumis depuis longtemps à l'action des agents atmosphériques.

Une autre preuve que ceux-ci sont étrangers à l'élaboration de la patine est tirée de la région de Metlaoui (Oued Lousif), où l'on peut observer, non loin de silex privés de patine, surbordonnés aux phosphates et placés dans les mêmes conditions de milieu, au point de vue de l'action des agents météoriques, des silex pourvus d'une patine typique. Ce sont des silex inclus dans un calcaire blanc, considéré comme le toit du complexe phosphaté. Identiques d'aspect à ceux de la craie, ils sont revêtus d'une patine blanchâtre de quelques millimètres d'épaisseur (II, p. 452). Cette différence radicale signifie que les influences météoriques ne doivent pas être mises en cause pour expliquer la formation de la patine des silex.

Le Bassin des Ganntour fournit à ce sujet un argument qu'on ne peut souhaiter plus probant. Une brèche de silex, prélevée au mur de la couche exploitée (p. 731), réserve une place importante à des fragments de patine typique (p. 732), extraits de silex à patine extrêmement développée, inclus dans la formation phosphatée même. De toute évidence, cette patine est d'origine sous-marine.

Tout concourt à démontrer que les silex sortent de leur milieu générateur, patinés ou non, et qu'ils soient enfouis à de grandes profondeurs, ou ramenés à la surface, ils restent indéfiniment pareils à eux-mêmes. La preuve en est faite depuis longtemps par les carottes de sondage extraites de la craie. Tel horizon, dont les silex sont pourvus de patines très épaisses aux affleurements, est caractérisé par les mêmes patines à des centaines de mètres en profondeur.

Destinée de la silice libérée par les Diatomées et les Radiolaires phosphatisés. Problème du réemploi de la silice éliminée sur le fond de la mer ⁽²⁾. — A la lumière de la constitution des phosphates

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1922, p. 464).

⁽²⁾ *Ibid.* — Considérations sur la silice et les silex des phosphates à Diatomées de l'Afrique du Nord (*C. R. Ac. Sc.*, t. CCXI, 1940, p. 169-172).

nord-africains, il paraît logique d'admettre qu'une réserve de silice exceptionnellement riche a fait partie intégrante des dépôts convertis en phosphate, et tout particulièrement de ceux du Bassin de Gafsa. Or, règle générale, le mécanisme de phosphatisation des vases à Diatomées comporte l'élimination de la quasi-totalité de la silice, c'est-à-dire de quoi élaborer une infinité de silex, dans l'hypothèse où cette substance s'est fixée définitivement dans les formations phosphatées.

Notons à ce sujet que le degré de fréquence des silex dans les complexes phosphatés, stériles compris, est fort loin de correspondre à la totalité de la silice des innombrables Diatomées incluses dans les grains, sans parler de celles qui ont été détruites, puis des Radiolaires mis à contribution et des Silicoflagellés. Il arrive même que l'écart soit considérable, comme c'est le cas pour la série phosphatée du Bassin de Gafsa, *la plus riche de toutes en Diatomées et, en même temps, l'une des plus pauvres en silex.*

De ce chef, un problème de grande portée se pose pour l'histoire de la silice d'origine organique. Il résulte de la disproportion observée que, dans le milieu envisagé, tout se passe comme s'il y avait à la fois, concentration d'une fraction de la silice sous forme de silex, et élimination d'une autre fraction, celle-ci beaucoup plus importante. A ce sujet, nous savons de source absolument certaine que la totalité de la silice éliminée l'a été sur le fond de la mer, lors de l'élaboration des grains, c'est-à-dire dans un milieu différent de celui où les matériaux phosphatés ont été concentrés. S'il en est ainsi, *il y a toutes probabilités pour que la silice non fixée à l'état de silex ait été réutilisée immédiatement, et nombre de fois, pour concourir à la formation de nouvelles carapaces de Diatomées.* En sorte que le total de silice mise en œuvre serait loin d'égaliser celui que représente la somme des Diatomées, à supposer que cette substance se renouvelle indéfiniment pour la formation des valves. Il en doit résulter une grande économie de matière pour alimenter un groupe d'organismes qui en fait une énorme consommation. Dans l'hypothèse où cette explication est en désaccord avec les faits, on ignore de la façon la plus absolue ce qu'est devenue la silice éliminée par la phosphatisation, exception faite pour celle des silex.

Le problème du réemploi sur le fond de la mer de la silice éliminée d'organismes, dont la fossilisation est assurée par d'autres substances, me paraît intéresser également les spicules d'Eponges et les Radiolaires, dans certains cas, c'est-à-dire qu'il est susceptible de revêtir une grande portée. De toute évidence, pour être traitée dans sa généralité, la question, maintenant posée, nécessite de longues et minutieuses recherches, tant sur le terrain qu'au laboratoire.

Constitution et morphologie des silex observés au toit de la formation phosphatée de l'Afrique du Nord. Enseignements qui en découlent. — Malgré les graves lacunes des observations que j'ai pu relever sur les silex des dépôts, couronnant la formation phosphatée de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc, il me paraît utile d'en dire quelques mots, dans le dessein de poser deux problèmes, qui sont loin d'être dépourvus d'intérêt.

En plusieurs régions, mon attention a été attirée par des variétés de silex qui se singularisent, soit par leur constitution, soit par leur morphologie, sans pouvoir m'assurer, faute de temps, que les représentants de chaque variété sont rigoureusement de même âge.

1° A la partie supérieure de la coupe de l'Oued Lousif (II, p. 452), il existe dans une pseudo-craie blanche, quelques silex cornés, avec ou sans patine, parfois enclavés dans des silex gris, et, principalement, de nombreux rognons de quartz très largement cristallisés, géodiques ou non. Ceux-ci existent indépendamment des silex cornés, ou en liaison intime avec eux. Lorsqu'ils sont étroitement associés, les complexes donnent l'impression que les rognons de quartz dérivent des silex proprement dits. On peut voir, par exemple, un nodule constitué par un silex corné typique, revêtu d'une patine, se fondant avec un rognon de quartz, ou encore un silex corné dont l'intérieur est converti en quartz cristallisé.

2° Des calcaires et marnes, surmontant la formation phosphatée de Redeyef (Tunisie), renferment de très beaux silex aplatis, mamelonnés, cornés sur la tranche, dont la morphologie rappelle celle des silex ménilites du Tertiaire parisien ⁽¹⁾, avec cette différence qu'elle est, en moyenne, beaucoup plus compliquée. En descendant de la table Zimra, dans la direction de Redeyef, on foule aux pieds un sol jonché de silex réalisant ce faciès.

3° De même qu'à Redeyef, les calcaires supérieurs aux phosphates du Djebel-Onk sont très riches en silex mamelonnés. Les sols constitués par cet horizon abondent en silex concrétionnés de toutes tailles, parfois énormes. Il en est parmi eux qui sont géodiques et plus ou moins quartzeux (II, p. 509).

4° Vers l'Ouest, je n'ai rencontré de formation analogue que dans le gisement des Ganntour, au Maroc, à proximité de l'Atlantique, ce qui ne veut nullement dire que le même horizon à silex n'existe pas dans l'intervalle. La belle coupe de la colline de Dekrakra (p. 716) permet d'étudier un calcaire à silex, situé à la base du complexe qui sépare la formation phosphatée des calcaires à Thersités. Entre parenthèses, ledit calcaire a pour mur la couche de phosphate la plus élevée de la formation. De grande finesse, la roche renferme une foule de silex mamelonnés, rappelant à s'y méprendre ceux qu'on observe également au toit du complexe phosphaté de Redeyef (II, p. 467). La planche XLI ne donne qu'une idée fort incomplète de la morphologie infiniment variée des silex en question. Quelques minutes suffisent pour en réunir une belle collection.

L'un des problèmes, auxquels j'ai fait allusion plus haut, vise la transformation des silex cornés en quartz très cristallin dans la région de Gafsa (Oued Lousif). En vérité, le plus grand mystère plane sur cette métamorphose et sur sa localisation dans un horizon qui, d'autre part, ne trahit en rien une influence exceptionnelle. On en peut dire autant des géodes et des noyaux de quartz, associés à des silex et sur le même plan, en pleine formation phosphatée au Kouif. Cette étroite association, inconnue dans les horizons supérieurs, plus exposés à l'action des agents atmosphériques, est de nature à faire supposer que *les matériaux plus ou moins quartzeux sont d'origine sous-marine, au même titre que les silex typiques qui leur font cortège*. Quoi qu'il en soit, et toute mystérieuse qu'elle est, la genèse du quartz secondaire, en milieu sédimentaire, peut être tenue pour certaine, une fois de plus, en dehors de toute influence métamorphique spéciale.

⁽¹⁾ L. CAYEUX. — Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*Mém. Carte Géol. France*, 1922, p. 663, pl. XXX, fig. 120 et 121).

Le second problème se trouve posé par le fait qu'à des distances considérables, les sédiments qui font suite à la formation phosphatée renferment des silex de type très aberrant, et tout aussi étroitement apparentés que s'ils avaient pris naissance côte à côte dans le même dépôt. Il n'est pas du tout concevable que de pareils silex aient pu se développer en même temps et s'identifier à ce point au cours d'une période continentale. Seul, le milieu sous-marin peut créer des conditions favorables à l'élaboration de concentrations siliceuses de type très spécial, identiques en des points très éloignés. A défaut d'arguments décisifs, dont on est loin de manquer pour attribuer une origine sous-marine à l'ensemble des silex, j'avoue que je n'en serais pas moins fort enclin à voir dans les silex quartzifiés, et surtout dans les silex à faciès de silex ménilite, des produits élaborés en milieu sous-marin. Cette orientation me paraît impliquer la nécessité de faire communiquer par mer les régions mises en cause.

CONCLUSIONS.

Un des résultats les plus tangibles de l'étude des phosphates nord-africains est de mettre le groupe des *Diatomées* sur le même plan, toutes proportions gardées, que les *Spongiaires* et les *Radiolaires*, au point de vue de l'élaboration des roches siliceuses d'origine organo-chimique. De ce chef, une importante lacune se trouve comblée dans l'histoire des roches siliceuses.

L'étude des silex, qui procèdent de la silice de ces Diatomées, renforce, sans les modifier, toutes les notions tirées de l'analyse des silex de la craie. En particulier, elle démontre, avec l'appui de faits très décisifs, que les silex en question ont pris naissance sous la mer et qu'ils ont pu être remaniés dans le milieu même dont ils dérivent. En outre, elle confirme tout ce que les craies magnésiennes nous ont appris sur la formation des silex, antérieurement à la dolomitisation. En plus des preuves, elle fournit des présomptions nouvelles, quant à la genèse immédiate des concentrations siliceuses.

Il est un point sur lequel il importe d'insister ici. D'une manière générale, les silex reflètent les caractères du milieu qui leur a donné naissance. C'est pourquoi les silex des phosphates en grains du Nord de l'Afrique diffèrent beaucoup dans leur faciès de ceux de la craie. Réserve faite pour les propriétés de la silice au microscope, on n'enregistre dans la mise en parallèle que des dissemblances portant sur la coloration, la composition, et la patine que l'on sait toujours absente. Au surplus, dans un gisement donné, on peut observer ce qu'on n'observe jamais dans la craie, c'est-à-dire une exceptionnelle variété de types de silex. A cette variété on ne trouve qu'une seule explication : les changements fréquents que subit le milieu générateur, sous l'influence des ruptures d'équilibre, se répercutant sur le faciès des silex. Il y aurait là une présomption de plus que les silex ont pris naissance sur le fond de la mer, ou peu s'en faut, et non pendant l'émergence des dépôts, ou plus tard.

Je crois devoir rappeler, ici, que l'analyse des formations phosphatées du Nord de l'Afrique enrichit le problème général de la genèse des silex de leurs sujets, dont l'un est de grande portée. Il s'agit du réemploi de la silice organique, libérée en grande masse sur le fond de la mer aux dépens des Diatomées. Avec le second, on retrouve la question de la genèse du quartz en milieu

sédimentaire, sans le concours d'actions métamorphiques spéciales. Les observations relevées confirment l'impression dégagée précédemment de l'analyse des roches siliceuses que les tentatives de synthèse du minéral n'ont jamais tenu compte des conditions réalisées en milieu sous-marin.

Des précédentes considérations sur les silex des phosphates en grains, il est permis de conclure qu'en dépit des nombreuses contributions réservées à l'étude des silex, au cours des derniers lustres, l'histoire de ces roches est loin de nous avoir livré tous ses secrets.

FIN DU TOME III.

TABLE DES FIGURES.

Figures.	Pages.
62. Coupe schématique et synthétique des carrières d'Oued-Zem	669
63. Coupe complète de la « voie normale »	671
64. Coupe schématique montrant la succession complète des couches II, I, O. Siège de Bou-Lanouar . . .	673
65. Coupe du Siège Bou-Jniba	674
65a. Un autre aspect de la coupe du Siège de Bou-Jniba	674
66. Coupe détaillée de la formation phosphatée de Dekakra	716
66a. Suite et fin de la coupe de Dekakra	717
67. Coupe schématique de la mine L. Gentil	718
68. Dressant de silex	719

TABLE DES PLANCHES

PLANCHE XXXIV.

- Fig. 103. Phosphate de la Couche II [$\times 45$]. Oued-Zem. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 104. Phosphate de la base de la Couche I [$\times 40$]. Oued-Zem. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 105. Phosphate du banc limite de la Couche V [$\times 75$]. Tranchée du chemin de fer. Bassin des Ouled-Abdoum (Maroc).
 Fig. 106. Phosphate de la Couche IV [$\times 40$]. Tranchée du chemin de fer. Bassin des Ouled-Abdoum (Maroc).

PLANCHE XXXV.

- Fig. 107. Microbrèche ossifère de la base de la Couche III, dans la tranchée du chemin de fer [$\times 35$]. Bassin des Ouled-Abdoum. Crétacé Supérieur (Maroc).
 Fig. 108. Calcaire phosphaté de la Couche III [$\times 40$]. Bassin des Ouled-Abdoum. Crétacé Sup. (Maroc).
 Fig. 109. Phosphate en grains de la Couche II [$\times 50$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

PLANCHE XXXVI.

- Fig. 110. Calcaire phosphaté du mur de la Couche I [$\times 50$]. Bou-Jniba. Eocène (Maroc).
 Fig. 111. Calcaire phosphaté de la Couche I [$\times 40$]. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 112. Phosphate de la Couche I [$\times 45$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

PLANCHE XXXVII.

- Fig. 113. Phosphate argileux du faux-toit [$\times 100$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 114. Calcaire phosphaté. Toit de la Couche I [$\times 60$]. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 115. Phosphate de la Couche O [$\times 50$]. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 116. Calcaire phosphaté supérieur à la Couche O [$\times 60$]. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

PLANCHE XXXVIII.

- Fig. 117. Silex du Cordon moyen [$\times 60$]. Couche I. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).
 Fig. 118. Phosphate argilo-ferrugineux [$\times 50$]. Kourigha. Couche I et II. Eocène (Maroc).
 Fig. 119. Phosphate argilo-ferrugineux [$\times 85$]. Kourigha. Couche II. Eocène (Maroc).

PLANCHE XXXIX.

- Fig. 120. Phosphate argilo-ferrugineux [$\times 85$]. Couche II. Kourigha. Eocène (Maroc).
 Fig. 121. Silex du Cordon inférieur prélevé dans une poche argileuse [$\times 45$]. Kourigha (Maroc).
 Fig. 122. Phosphate de chaux. Plan IV [$\times 60$]. Mine L. Gentil. Bassin des Ganntour-Montien (Maroc).

PLANCHE XL.

- Fig. 123. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Descendrie Dekakra. Mine L. Gentil. Montien (Maroc).
 Fig. 124. Phosphate de chaux [$\times 40$]. Descendrie Dekakra. Mine L. Gentil. Montien (Maroc).
 Fig. 125. Phosphate de chaux [$\times 60$]. Descendrie Dekakra. Mine L. Gentil. Montien (Maroc).
 Fig. 126. Calcaire phosphaté du mur [$\times 100$]. Dekakra. Mine L. Gentil. Bassin des Ganntour (Maroc).

PLANCHE XLI.

- Fig. 127-132. Silex de la formation phosphatée des Ganntour. Colline de Dekakra (Maroc). Variétés morphologiques.

PLANCHE XLII.

- Fig. 133. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Couche IV. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.
 Fig. 134. Phosphate de chaux [$\times 40$]. Couche III. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.
 Fig. 135. Phosphate. Couche II [$\times 50$]. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.

PLANCHE XLIII.

- Fig. 136. Phosphate de chaux [$\times 85$]. Couche I. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.
 Fig. 137. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Couche inférieure. Les Meskala. Maëstrichtien. Région méridionale du Maroc occidental.
 Fig. 138. Phosphate de chaux [$\times 70$]. Surface de la Couche supérieure. Les Meskala. Eonummulitique. Maroc occidental.

PLANCHE XLIV.

- Fig. 139. Brèche ossifère au-dessous d'un gros banc de silex [$\times 40$]. Les Meskala. Région méridionale du Maroc occidental.
 Fig. 140. Silex phosphaté [$\times 50$]. Les Meskala (Maroc occidental).
 Fig. 141. Silex phosphaté [$\times 120$]. Les Meskala (Maroc occidental).

PLANCHE XLV.

- Fig. 142. Phosphate [$\times 40$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène. Atlas de Marakech.
Fig. 143. Phosphate silicifié [$\times 65$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène. Atlas de Marrakech.
Fig. 144. Phosphate glauconieux [$\times 60$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène. Atlas de Marrakech.

PLANCHE XLVI.

- Fig. 145. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Agadour. Gisement de Kik. Atlas de Marrakech.
Fig. 146. Phosphate [$\times 170$]. Agadour. Gisement de Kik. Atlas de Marakech.
Fig. 147. Phosphate de chaux [$\times 35$]. Couche phosphatée. Plateau de Kik. Atlas de Marakech.

PLANCHE XLVII.

- Fig. 148. Phosphate de chaux [$\times 40$]. Plateau de Thamdakhit. Eocène de Timelit (Maroc).
Fig. 149. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Daoualel (Mauritanie).
Fig. 150. Calcaire phosphatée [$\times 70$]. Daoualel (Mauritanie).

PLANCHE XLVIII.

- Fig. 151. Phosphate quartzeux [$\times 50$]. Daoualel (Mauritanie).
Fig. 152. Phosphate de chaux [$\times 50$]. Civé (Mauritanie).
Fig. 153. Silex phosphaté à Globigérines [$\times 50$]. Sebikatane (Sénégal).
Fig. 154. Phosphate grumeleux [$\times 50$]. M'Pallo. Cercle Thiès (Sénégal).

PLANCHE XLIX.

- Fig. 155. Phosphate grumeleux [$\times 60$]. M'Pallo. Cercle Thiès. (Sénégal).
Fig. 156. Phosphate silicifié [$\times 40$]. M'Pando. (Gabon).
Fig. 157. Phosphate silicifié à Foraminifères [$\times 50$]. Lagune Iguela (Gabon).
Fig. 158. Phosphate silicifié à Foraminifères [$\times 80$]. Lagune Iguela (Gabon).

PLANCHE L.

- Fig. 159. Phosphate silicifié [$\times 50$]. Région de Kola (Moyen-Congo).
Fig. 160. Phosphate silicifié [$\times 100$]. Région de Kola (Moyen-Congo).

PLANCHE LI.

Nodules phosphatés de l'Agulhas-Bank.

- Fig. 161. Nodule profondément échancré.
Fig. 162. Nodule orné de protubérances.
Fig. 163. Forme arrondie.
Fig. 164. Forme mamelonnée, perforée de nombreuses cavités.
Fig. 165. Nodule d'aspect tuberculeux et scorifiée.

PLANCHE LII.

- Fig. 166. Nodule calcaréo-phosphaté très quartzeux [$\times 50$]. Agulhas-Bank.
Fig. 167. Nodule calcaréo-phosphaté très glauconieux [$\times 45$]. Agulhas-Bank.
Fig. 168. Nodule calcaréo-phosphaté à Bryozoaires et Pulvinulines [$\times 50$]. Agulhas-Bank.
Fig. 169. Nodule calcaréo-phosphaté pétri de Globigérines [$\times 50$]. Agulhas-Bank.

PLANCHE LIII.

- Fig. 170. Nodule phosphaté, ferrugineux, à Globigérines [$\times 60$]. Agulhas-Bank.
Fig. 171. Nodule de sable vert phosphaté [$\times 50$]. Agulhas-Bank.
Fig. 172. Nodule formé de deux roches différentes [$\times 45$]. Agulhas-Bank.

PLANCHE LIV.

- Fig. 173 à 176. Microphotographies exécutées en lumière infra-rouge et mettant en évidence des Bactéries fossiles.

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE IV.

PHOSPHATES EN GRAINS CRÉTACÉS ET TERTIAIRES DU NORD DE L'AFRIQUE. (Suite et fin.)

	Pages.
4. LES PHOSPHATES DU MAROC.....	662
Généralités.....	662
Premier bassin, des Ouled-Abdoun.....	666
Coupes détaillées de la formation phosphatée.....	668
Deuxième bassin, des Ganntour.....	714
Troisième et quatrième bassins, région méridionale du Maroc occidental et de l'Atlas de Marrakech ..	736

CHAPITRE V.

PHOSPHATES DE CHAUX DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE ET DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE.

1. PHOSPHATES DE L'AFRIQUE OCCIDENTALE FRANÇAISE.....	763
Phosphates de Mauritanie.....	764
Phosphates du Sénégal.....	771
Phosphates du Soudan français.....	776
Conclusions relatives aux phosphates de l'Afrique occidentale française.....	780
2. PHOSPHATES DE L'AFRIQUE ÉQUATORIALE FRANÇAISE.....	781
Phosphates du Gabon.....	781
Phosphates du Moyen-Congo.....	786
Coup d'œil sur les phosphates de l'Afrique équatoriale française.....	806
Rapports et différences entre les phosphates de l'Afrique du Nord et ceux de l'Afrique occidentale et équatoriale française.....	807

CHAPITRE VI.

PHOSPHATES TERTIAIRES AUTRES QUE LES PHOSPHATES AFRICAINS.....	809
--	-----

CHAPITRE VII.

PHOSPHATES DE FORMATION ACTUELLE OU RÉCENTE.

1. PHOSPHATES DE CHAUX DES SÉDIMENTS ACTUELS.....	811
Concentrations de phosphate de chaux dans les mers actuelles sous forme de nodules.....	812
Les nodules phosphatés de l'Agulhas-Bank.....	819

TABLE DES MATIÈRES.

1019

CHAPITRE VIII.

Pages.

GÉNÉRALITÉS SUR LES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.

1. DONNÉES ESSENTIELLES SUR LES MATÉRIAUX CONSTITUANTS.....	845
Constitution des phosphates.....	846
État d'agrégation des phosphates.....	882
Facteurs de la coloration des phosphates en grains et nodules.....	884
2. DONNÉES CHIMIQUES.....	885
3. DONNÉES GÉOLOGIQUES.....	886
Caractères des gisements de phosphates de chaux sédimentaires.....	886
Les perforations d'origine organique et les enseignements qui en découlent au point de vue du milieu générateur des gisements de phosphate de chaux.....	886
4. ORIGINE DES GISEMENTS DE PHOSPHATE DE CHAUX.....	896
Diffusion et concentration du phosphate de chaux en milieu marin.....	897
Fixation du phosphate de chaux éliminé de l'eau de mer sous forme d'éléments phosphatés.....	919
Transport et concentration des matériaux phosphatés en des points d'élection, correspondant à nos bassins phosphatés.....	930
Recherche du milieu générateur des éléments phosphatés des gisements de Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie.....	932
5. CONDITIONS DU MILIEU GÉNÉRATEUR DES GISEMENTS.....	936
Genèse des gisements de phosphate en milieu terrigène et pélagique.....	936
Instabilité du milieu générateur des gisements. Ruptures d'équilibre.....	938
Phénomènes de remaniements sous-marins. Enseignements tirés de la constitution des complexes phosphatés remaniés dans les phosphates en grains.....	942
Intervention constante des courants.....	944
Assimilation des synclinaux phosphatés à des cuvettes sédimentaires.....	946
Bathymétrie des mers à phosphates.....	948
6. ENSEIGNEMENTS D'ORDRE GÉNÉRAL TIRÉS DE L'ÉTUDE DES PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES.....	950
Déplacements des formations phosphatées dans l'espace avec le temps.....	951
Rôle des phénomènes d'épigénie dans la formation des phosphates de chaux sédimentaires.....	952
Facteurs de la variété et de l'uniformité de caractère des gisements de phosphate de chaux.....	954
Rôle prépondérant des activités sous-marines dans l'élaboration des phosphates de chaux sédimentaires.....	955
Parallèle entre l'histoire des phosphates en grains et celle des minerais de fer oolithique.....	956
Phénomènes de convergence dans le domaine des phosphates de chaux.....	957
Considérations sur le problème paléogéographique posé par les grains de quartz, de phosphate et de glauconie.....	958
Le problème de la formation des silex en milieu phosphaté.....	959
Table des figures.....	1013
Table des planches.....	1014

PLANCHE XXXIV.

PLANCHE XXXIV.

Fig. 103. PHOSPHATE DE LA COUCHE II [$\times 45$]. Oued-Zem. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Grain de phosphate limpide.
- b.* Grain riche en matière organique, bordé d'une zone périphérique limpide.
- c.* Grain riche en matières organiques, à structure concentrique.
- d.* Grain dont la zone périphérique hyaline est sans action sur la lumière polarisée.
- e.* Grain à fragments de Foraminifères.
- f.* Gangue en calcite cristallisée.

Fig. 104. PHOSPHATE DE LA BASE DE LA COUCHE I [$\times 40$]. Oued-Zem. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Grain de phosphate limpide.
- b.* Grain de phosphate à couronne gris-noirâtre redevable à des matières organiques.
- c.* Phénomène inverse : couronne limpide à noyau profondément souillé de matières organiques.
- d.* Grain, où la complexité de structure atteint son maximum.
- e.* Complexe remanié.
- f.* Quartz détritique.
- g.* Restes de Vertèbres.
- h.* Ciment en calcite largement cristallisée.

Fig. 105. PHOSPHATE DU BANC LIMITE DE LA COUCHE IV [$\times 75$]. Tranchée du chemin de fer. Bassin des Ouled-Abdoum (Maroc).

- a.* Grains phosphatées, exempts d'impuretés.
- b.* Grain à enveloppe hyaline.
- c.* Grain sombre, riche en matière organique.
- d.* Grain fragmentaire.
- e.* Grains phosphatés renfermant des inclusions organiques indéfinies.
- f.* Ciment en calcite largement cristallisée.

Fig. 106. PHOSPHATE DE LA COUCHE IV. [$\times 40$]. Tranchée du chemin de fer. Bassin des Ouled-Abdoum (Maroc).

- a.* Grains limpides.
- b.* Grain différencié, à structure concentrique.
- c.* Élément phosphaté double, formé de deux grains l'un dans l'autre.
- d.* Gangue en calcite très largement cristallisée.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XXXIV

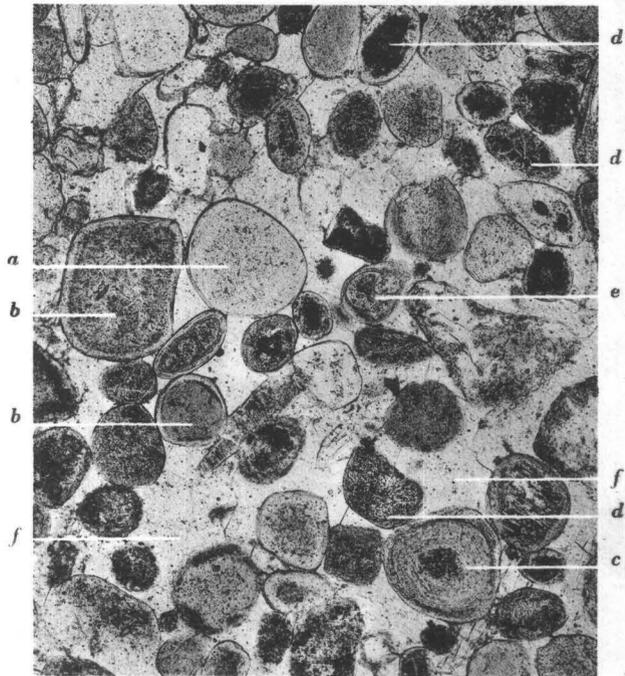


FIG. 103

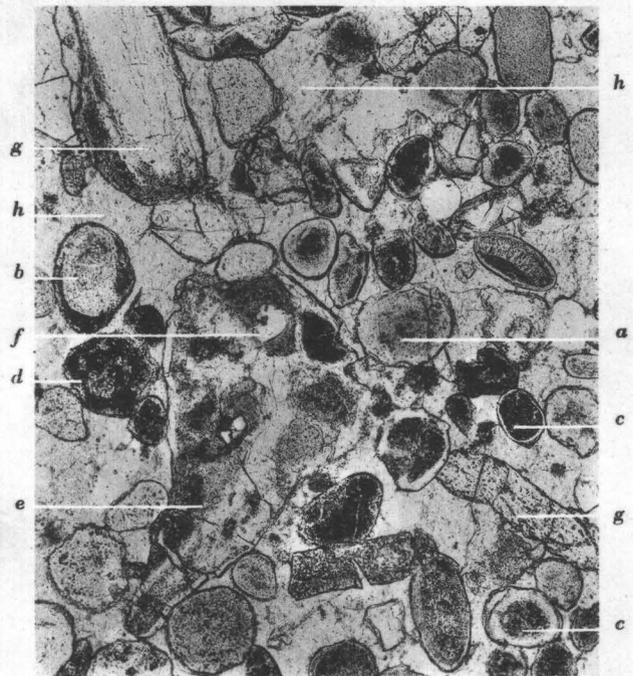


FIG. 104

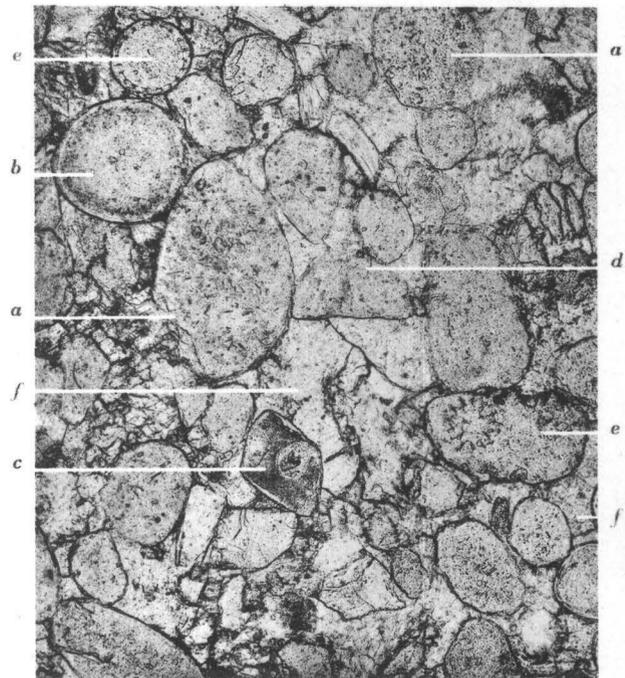


FIG. 105

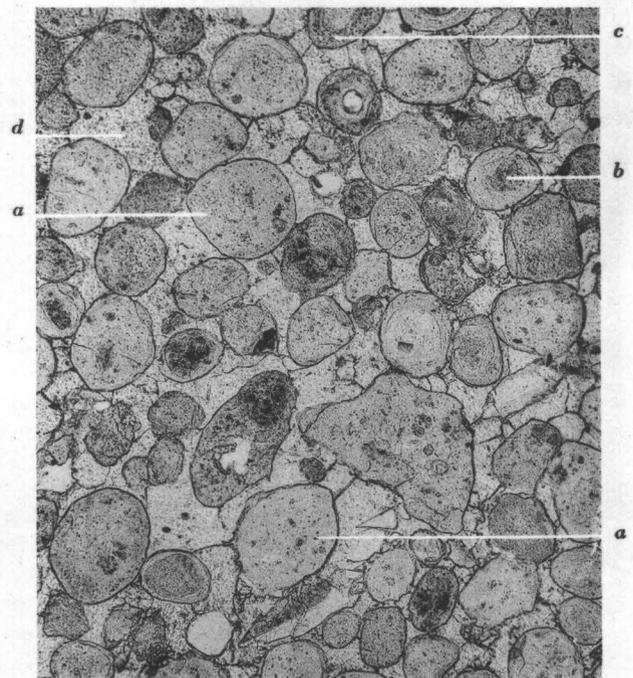


FIG. 106

PLANCHE XXXV.

PLANCHE XXXV.

Fig. 107. MICROBRÈCHE DE LA BASE DE LA COUCHE III. [$\times 35$]. Tranchée du chemin de fer. Kourigha. Crétacé Supérieur (Maroc).

- a.* Fragments de tissu osseux à microstructure conservée.
- b.* Fragments de tissu osseux dépourvus de structure caractéristique.
- c.* Grains phosphatés.
- d.* Ciment de calcite largement cristallisée.

Fig. 108. CALCAIRE PHOSPHATÉ DE LA COUCHE III [$\times 40$]. Bassin des Ouled-Abdoum. Crétacé Supérieur (Maroc).

- a.* Grains phosphatés limpides, exempts d'inclusions.
- b.* Grains riches en inclusions de calcite à contour rongés.
- c.* Grains bourrés de témoins de microplankton susceptibles d'être pyritisés.
- d.* Eléments de type exceptionnel à structure concentrique très fine et nette.
- e.* Grains doubles, peu répandus.
- f.* Grain fragmentaire.
- g.* Débris de tissu osseux.
- h.* Gangue en calcite pure très largement cristallisée.
- i.* Fragments de roche préexistante.

Fig. 109. PHOSPHATE EN GRAINS DE LA COUCHE II [$\times 50$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Élément revêtu d'une enveloppe de phosphate très pure, interrompue par de faibles divisions radiales.
- b.* Grain fragmentaire.
- c.* Élément de tissu osseux.
- d.* Ciment en calcite.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XXXV



FIG. 107

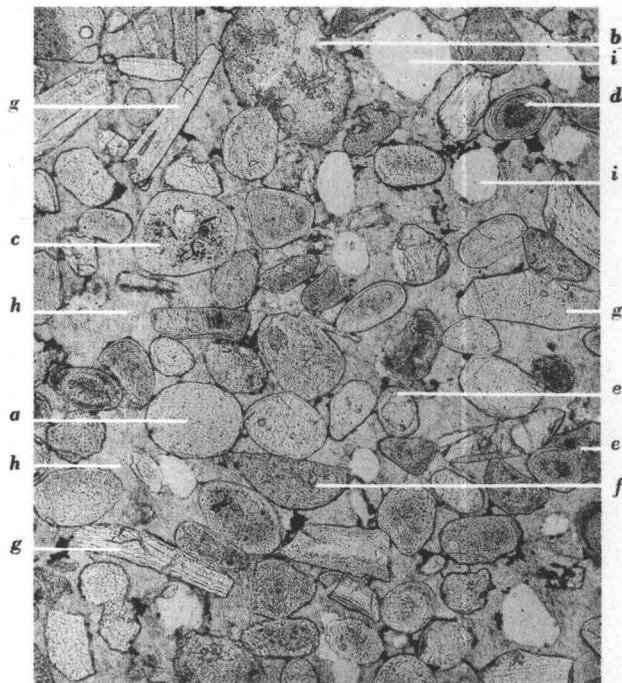


FIG. 108

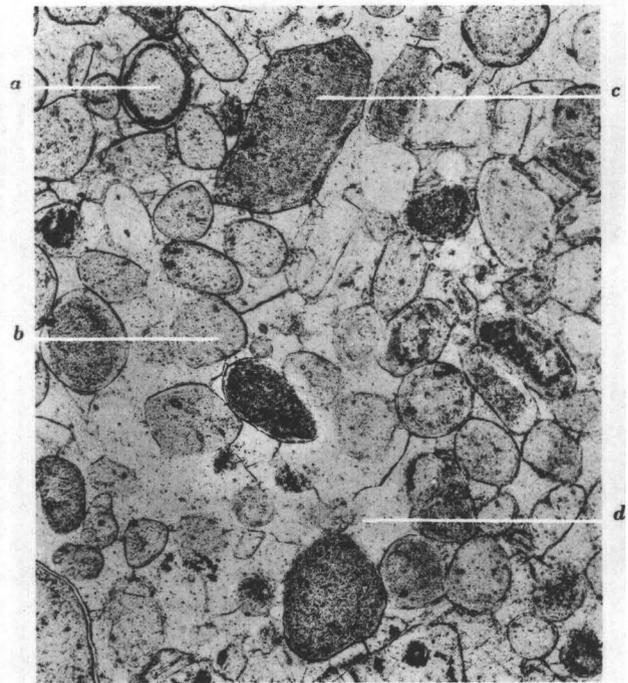


FIG. 109

PLANCHE XXXVI.

PLANCHE XXXVI.

Fig. 110. CALCAIRE PHOSPHATÉ DU MUR DE LA COUCHE I [$\times 50$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés indifférenciés.
- b.* Grain à enveloppe transparente.
- c.* Grain à auréole moins pure que le centre.
- d.* Ciment en calcite largement cristallisée.
- e.* Ilôt de phosphate argilo-ferrugineux.

Fig. 111. CALCAIRE PHOSPHATÉ DE LA COUCHE I [$\times 40$]. Kourigha. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés indifférenciés dans toute leur épaisseur.
- b.* Grain renfermant quelques inclusions.
- c.* Grain à différenciation superficielle.
- d.* Grains pétris de débris de Diatomées et de témoins de calcite corrodée.
- e.* Débris osseux.
- f.* Ciment calcaire.

Fig. 112. PHOSPHATE DE LA COUCHE I [$\times 45$]. Bou-Jniba. Kourigha-Eocène (Maroc).

- a.* Grain de phosphate indifférencié.
- b.* Grain à enveloppe transparente.
- c.* Fragments de tissu osseux.
- d.* Ciment calcaire largement cristallisé.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XXXVI

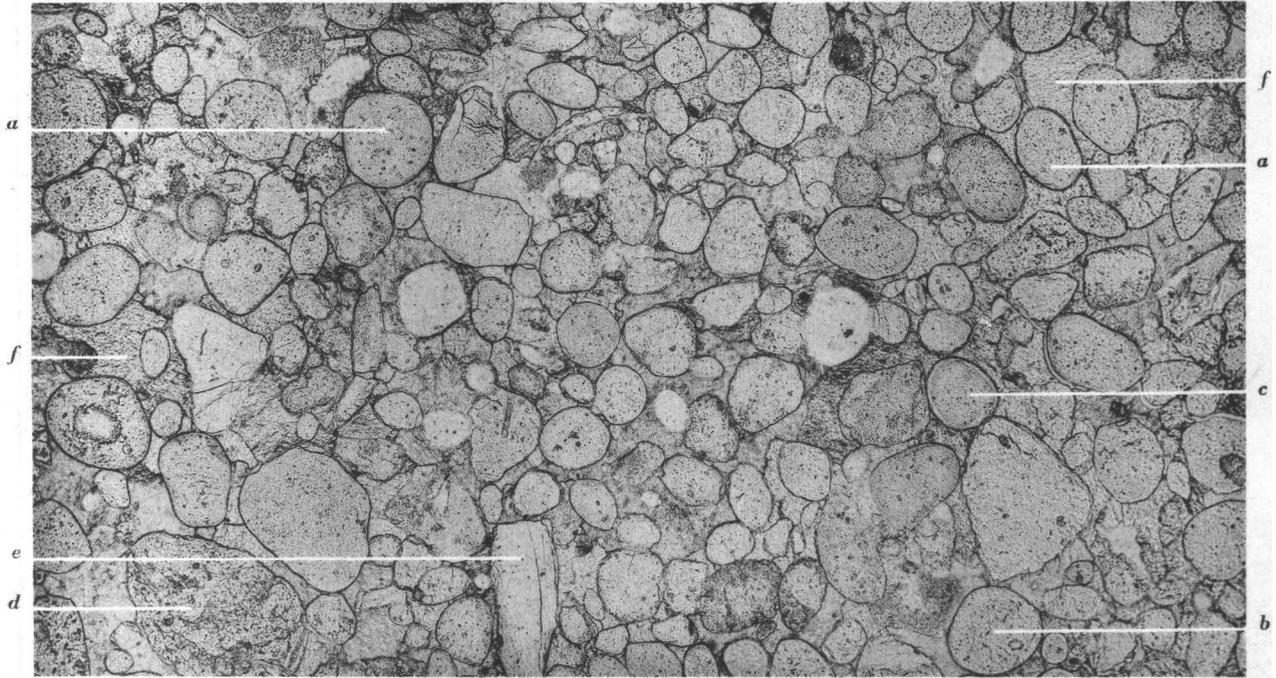


FIG. 111

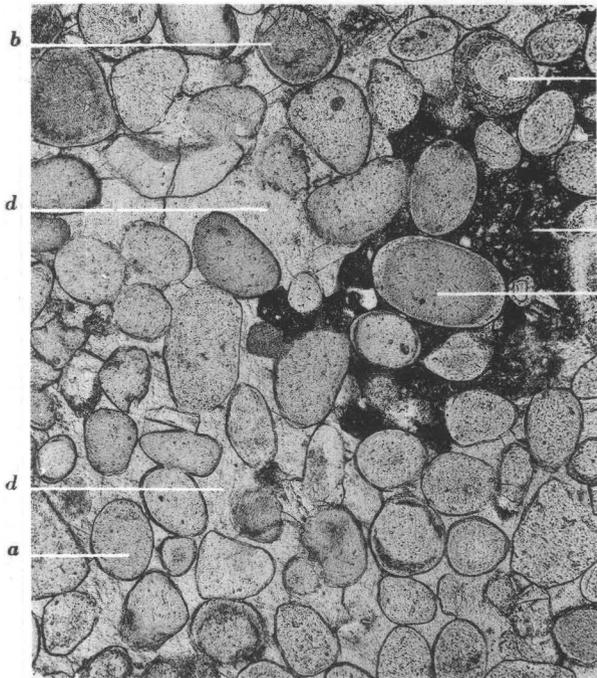


FIG. 110

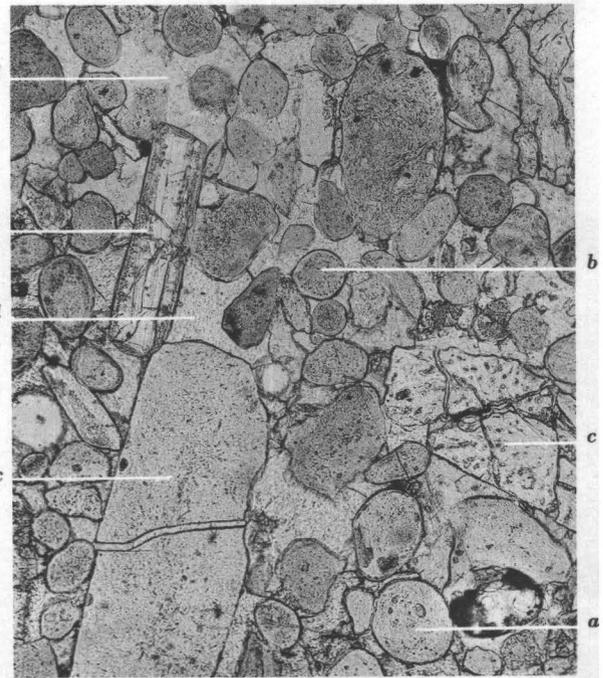


FIG. 112

PLANCHE XXXVII.

PLANCHE XXXVII.

Fig. 113. PHOSPHATE ARGILEUX DU FAUX-TOIT [$\times 100$]. Bou-Jniba. Bassin des Ouled-Abdoun. Eocène (Maroc).

- a.* Grains de phosphate.
- b.* Fond de matière argileuse.
- c.* Rhomboèdres de calcite.
- d.* Grains de quartz.

Fig. 114. CALCAIRE PHOSPHATÉ DU TOIT DE LA COUCHE I [$\times 60$]. Bassin des Ouled-Abdoun. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Grain phosphaté où l'on retrouve un résidu de vase à Diatomées.
- c.* Débris de tissu osseux.
- d.* Gangue composée de calcite largement cristallisée.

Fig. 115. PHOSPHATE DE LA COUCHE O [$\times 50$]. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoun. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés indifférenciés, purs.
- b.* Grains renfermant des débris de microplankton.
- c.* Grain rempli d'impuretés.
- d.* Fragment de tissu osseux.
- e.* Grain de quartz.
- . Ciment en calcite largement cristallisée.

Fig. 116. CALCAIRE PHOSPHATÉ SUPÉRIEUR À LA COUCHE O [$\times 60$]. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoun. Eocène (Maroc).

- a.* Grains de phosphate renfermant des débris indéchiffrables de microplankton.
- b.* Grain de phosphate renfermant un Radiolaire centré.
- c.* Fragment de tissu osseux.
- d.* Ciment en calcite.

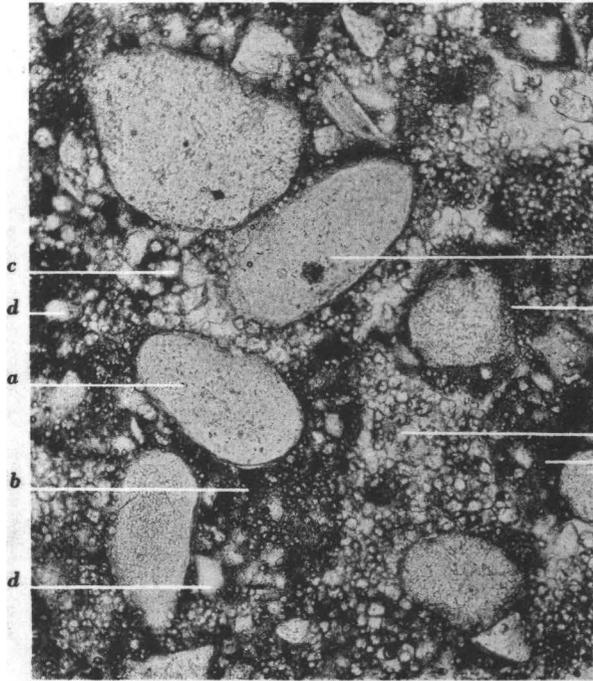


FIG. 113

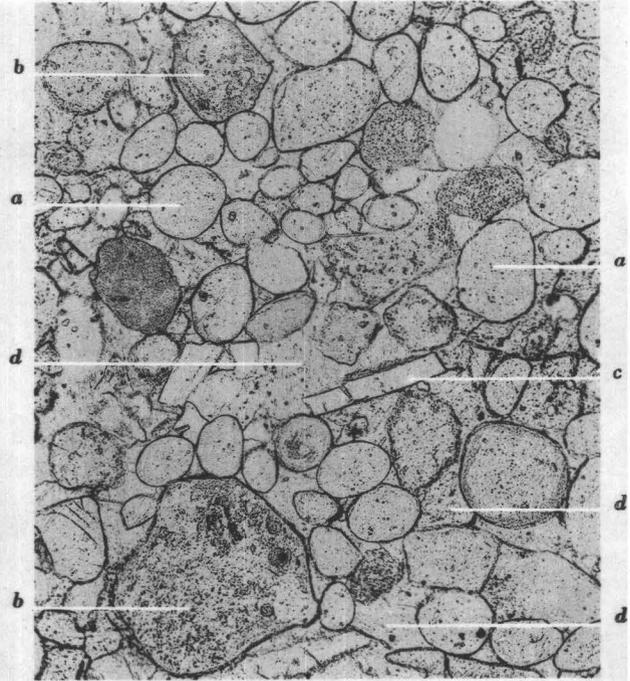


FIG. 114

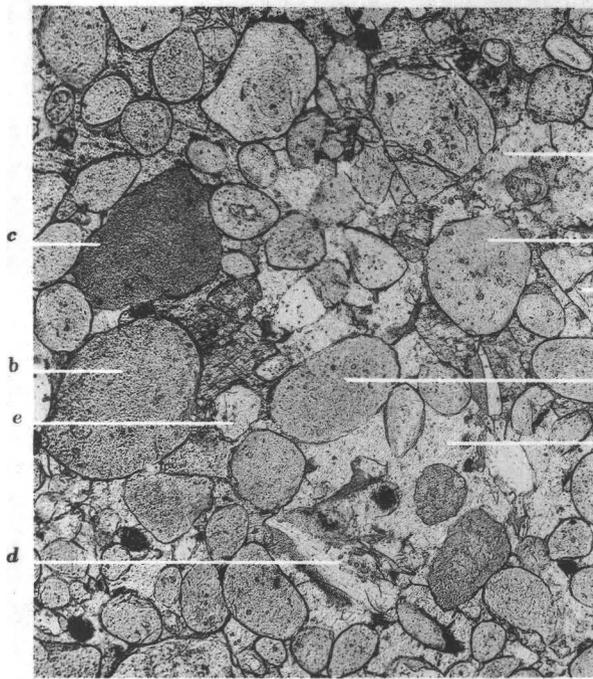


FIG. 115

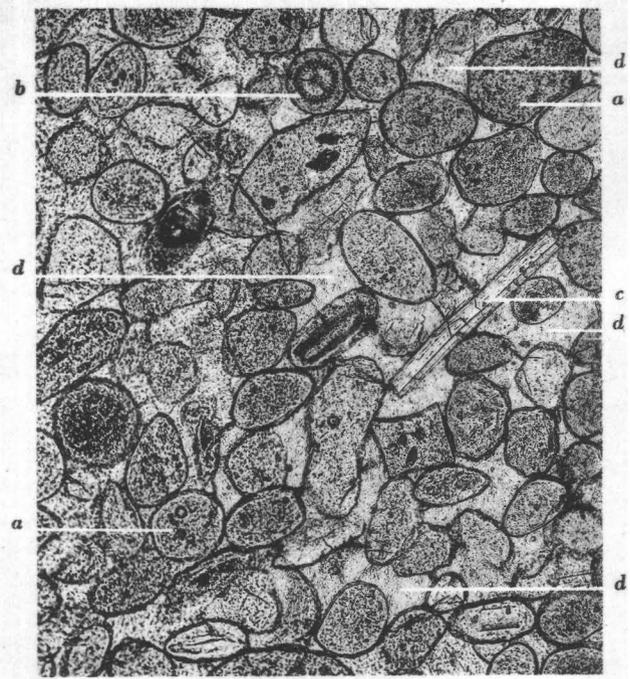


FIG. 116

PLANCHE XXXVIII.

PLANCHE XXXVIII.

Fig. 117. SILEX DU CORDON MOYEN. COUCHE I [$\times 60$]. Bou-Lanouar. Bassin des Ouled-Abdoum. Eocène (Maroc).

- a.* Grains plus ou moins riches en ponctuations noires extrêmement fines et plus ou moins serrées.
- b.* Grains rendus plus ou moins opaques par les mêmes inclusions développées à dose massive.
- c.* Grains ne laissant discerner aucune trace de phosphate de chaux en sections minces, tant le pigment est concentré.
- d.* Eléments envahis à des degrés divers par les matières hydrocarburées.
- e.* Grains dont les hydrocarbures sont concentrés en une mince couronne.
- f.* Grains avec concentrations des inclusions dessinant des sortes de noyaux.
- g.* Ciment en calcédonite microcristalline.

Fig. 118. PHOSPHATE ARGILO-FERRUGINEUX [$\times 50$]. COUCHE I ET II. Kourigha. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Quartz détritique.
- c.* Rhomboédres de calcite.
- d.* Ciment argilo-ferrugineux.

Fig. 119. PHOSPHATE ARGILO-FERRUGINEUX [$\times 85$]. Kourigha. Couche II. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Fragments de tissu osseux.
- c.* Calcite en grains.
- d.* Quartz détritique.

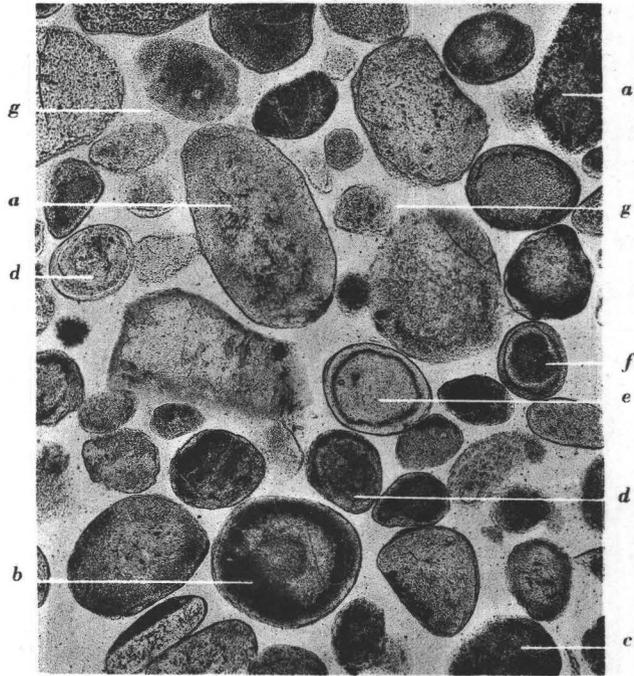


FIG. 117

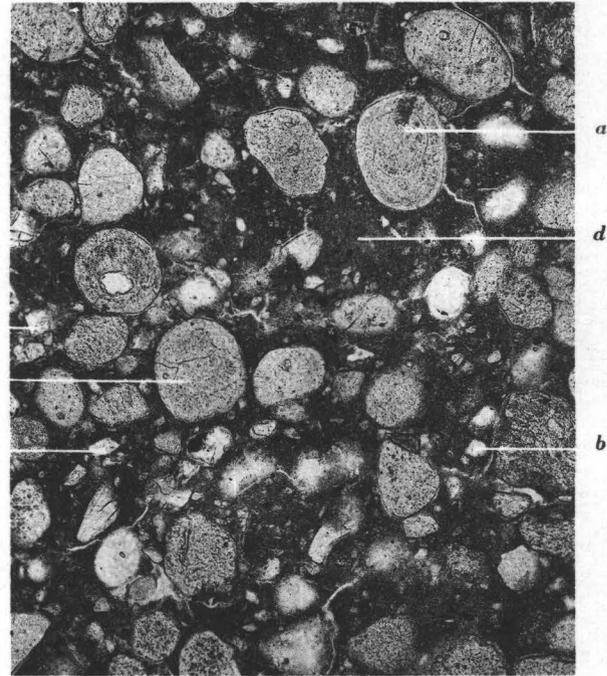


FIG. 118

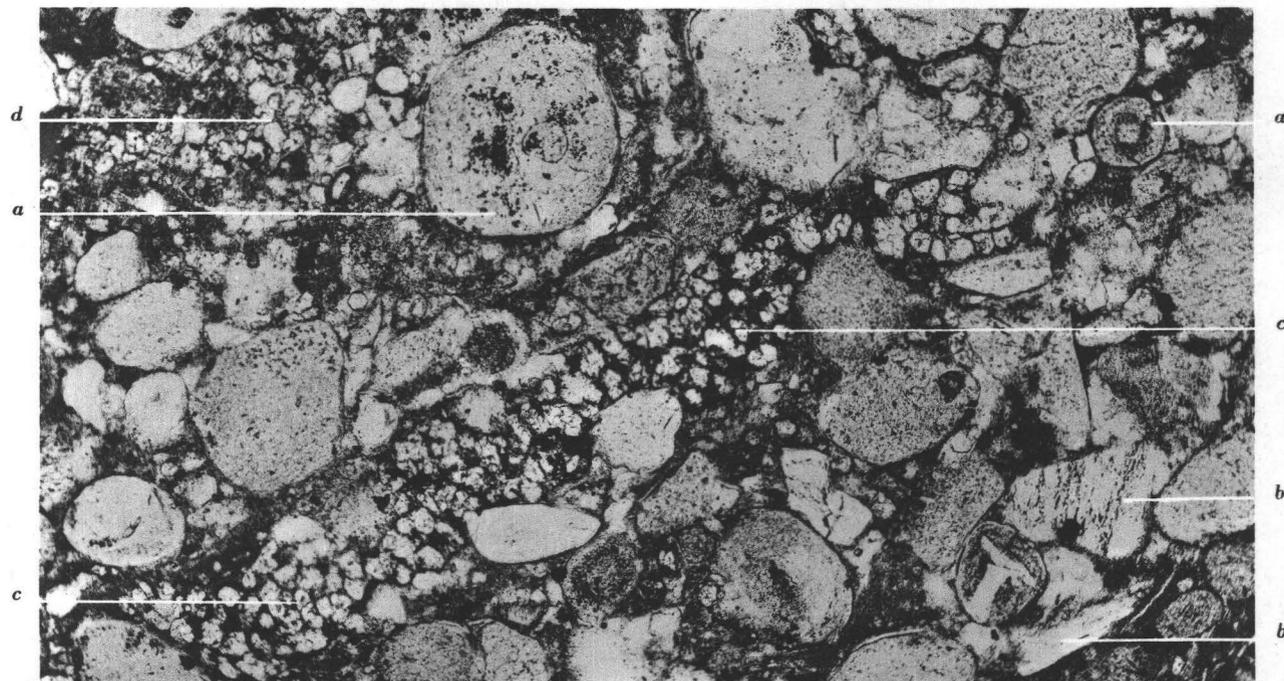


FIG. 119

PLANCHE XXXIX.

PLANCHE XXXIX.

Fig. 120. PHOSPHATE ARGILO-FERRUGINEUX. [$\times 86$]. Couche II. Kourigha. Eocène (Maroc).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Cristaux de calcite.
- c.* Quartz détritique.
- d.* Fond argilo-ferrugineux.

Fig. 121. SILEX DU GORDON INFÉRIEUR, PRÉLEVÉ DANS UNE POCHÉ ARGILEUSE [$\times 45$]. Kourigha (Maroc).

- a, b, c, d, e.* Grains de phosphate présentant différents degrés de complexité.
- f.* Fragments de tissu osseux.
- g.* Ciment de calcédonite microcristalline.

Fig. 122. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 60$]. Plan IV. Mine L. Gentil. Bassin des Ganntour-Montien (Maroc).

- a.* Grains de phosphate limpides.
- b.* Grains formés d'un petit noyau phosphaté ayant servi de centre d'attraction à un élément plus gros.
- c.* Quartz détritique.
- d.* Espaces intergranulaires où on voit le manque de ciment.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XXXIX

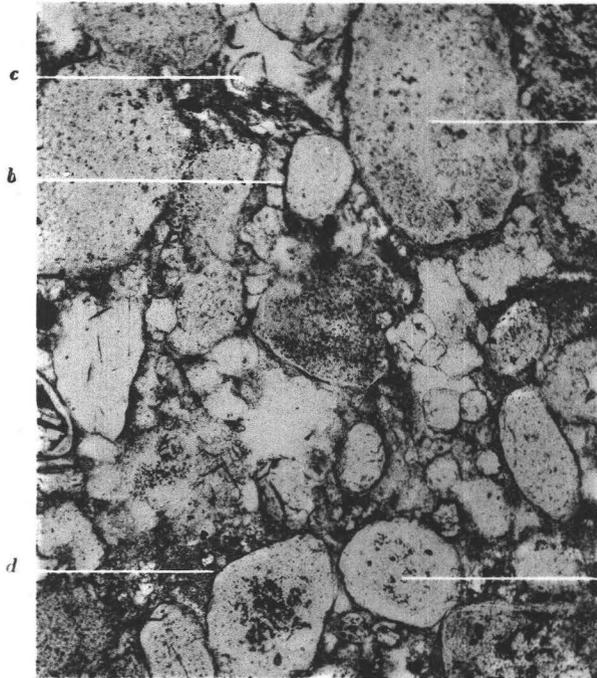


FIG. 120

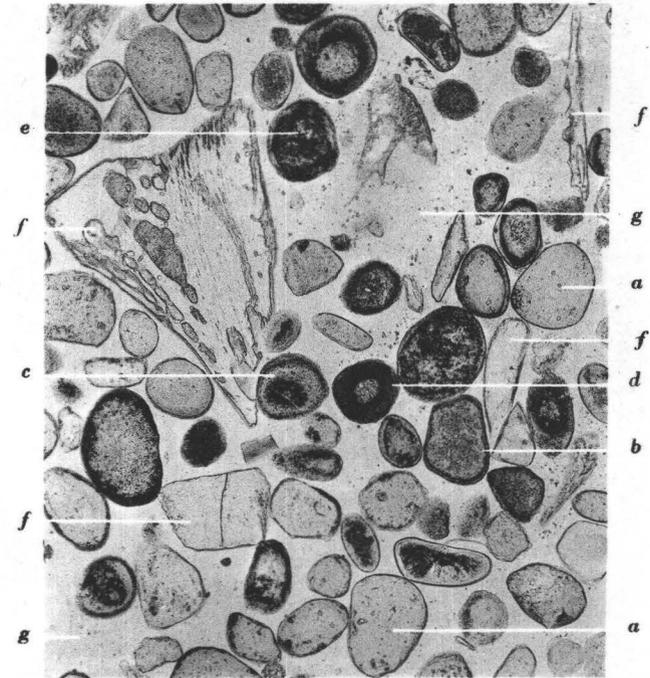


FIG. 121

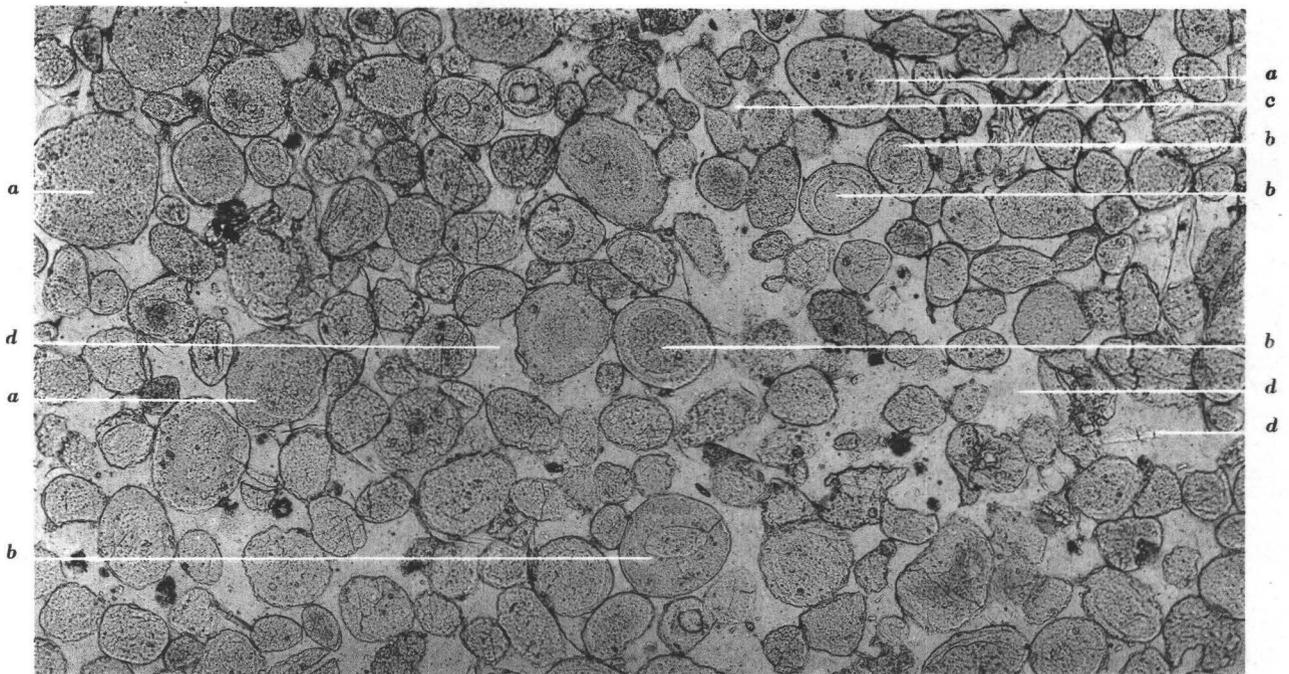


FIG. 122

PLANCHE XL.

PLANCHE XL.

Fig. 123. PHOSPHATE DE CHAUX. [$\times 50$]. Descendrie Dekakra. Mine L. Gentil. Bassin des Ganntour-Montien (Maroc)

- a.* Grains de phosphates légèrement et uniformément teintés.
- b.* Grains à noyau sombre.
- c.* Grains dont le pigment est concentré dans une couronne périphérique.
- d.* Grains possédant une couronne périphérique claire.
- e.* Quartz détritique.

Fig. 124. PHOSPHATE DE CHAUX. [$\times 40$]. Descendrie Dekakra. Montien (Maroc).

- a.* Grains phosphatés uniformément pigmentés.
- b.* Grains à pseudonoyaux correspondant à de fortes concentrations de hydrocarbures.
- c.* Élément à couronne opaque et noyau à peine teinté.
- d.* Fragment de tissu osseux.
- e.* Grain de quartz.
- f.* Grains imprégnés de hydrocarbures dans toute leur épaisseur.
- g.* Gangue en calcite microgrenue imprégnée de hydrocarbures.

Fig. 125 PHOSPHATE DE CHAUX. [$\times 60$]. Descendrie Dekakra. Montien (Maroc).

- a.* Grains phosphatés clairs.
- b, c, d,* Grains phosphatés à structures différenciées grâce à des manières différentes d'imprégnation de hydrocarbures.
- e.* Foraminifères.
- f.* Quartz détritique.
- g.* Trainées de calcite.
- h.* Bandelettes de calcite imprégnées de hydrocarbures.

Fig. 126. CALCAIRE PHOSPHATÉ DU MUR. [$\times 100$]. Mine L. Gentil (Maroc).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Ciment, en calcite grenue, largement développé et remplissant tous les vides intergranulaires.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XL

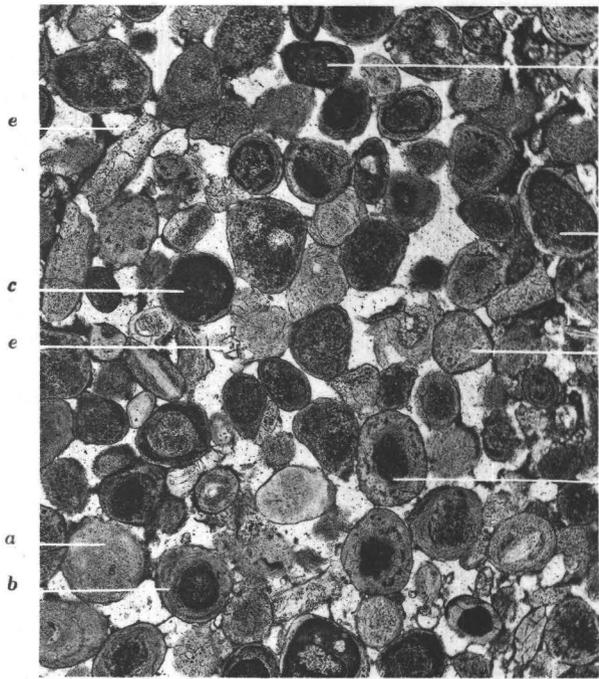


FIG. 123

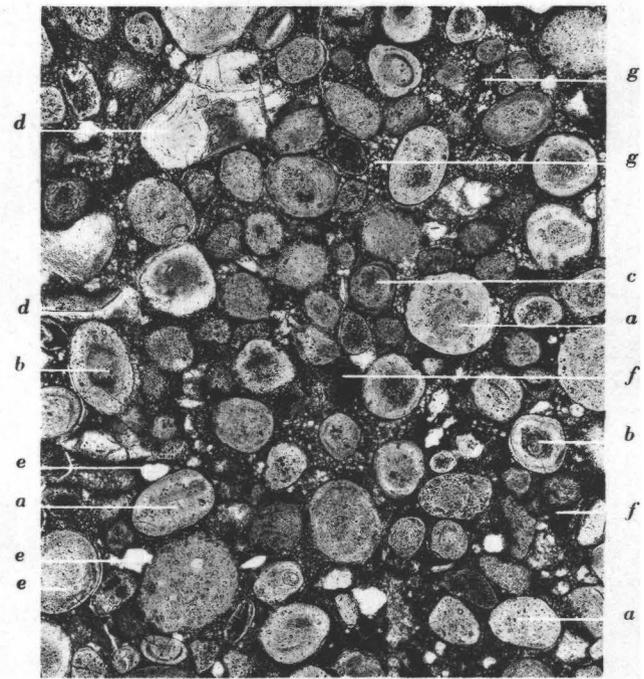


FIG. 124

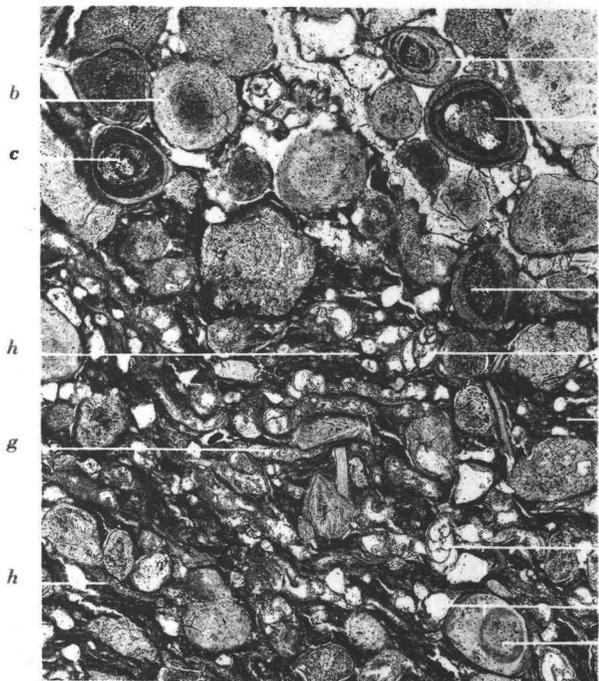


FIG. 125

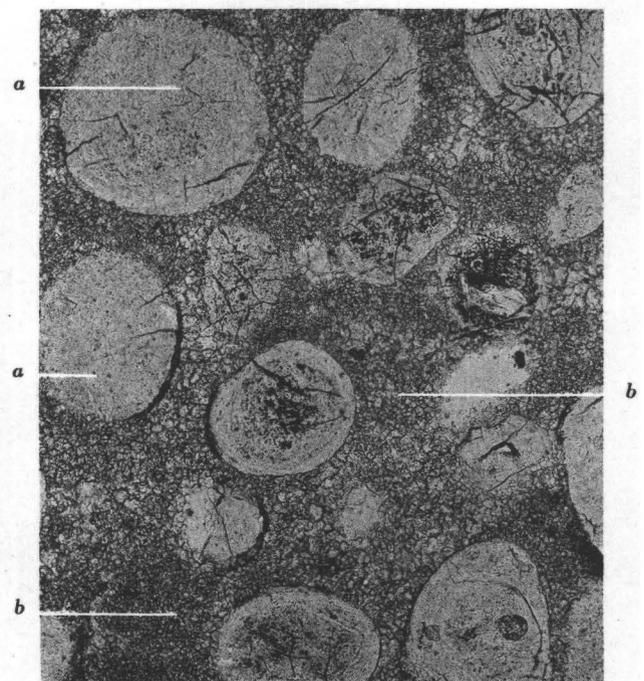


FIG. 126

PLANCHE XLI.

PLANCHE XLI.

SILEX DE LA FORMATION PHOSPHATÉE DES GANNTOUR. COLLINE DE DEKAKRA (Maroc).

Fig. 127 à 132. Quelques variétés morphologiques des rognons de silex.

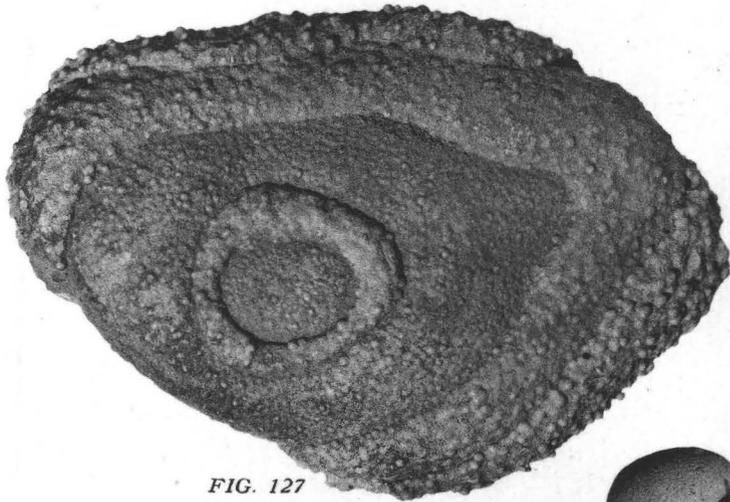


FIG. 127

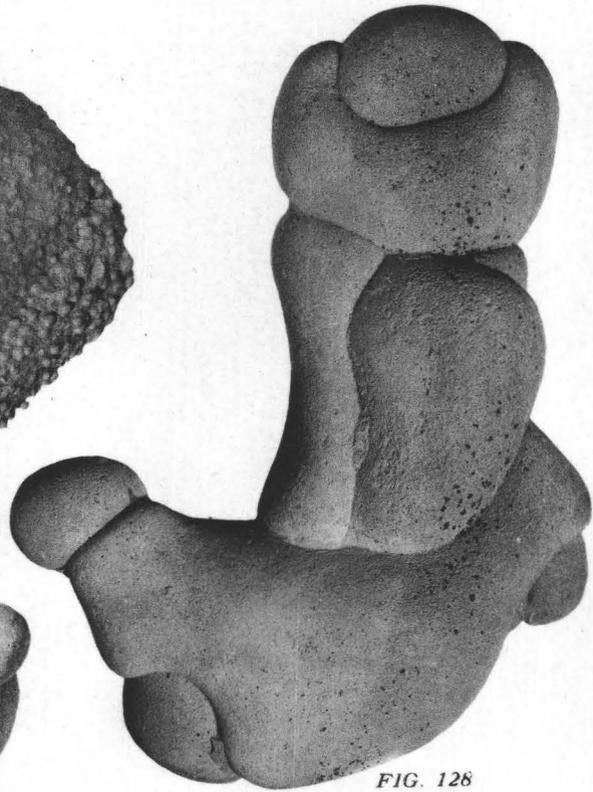


FIG. 128

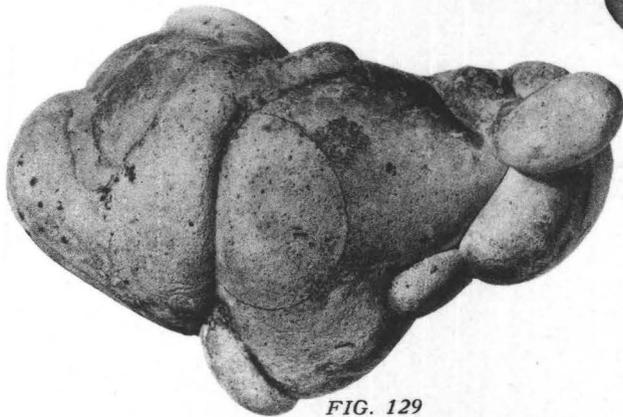


FIG. 129

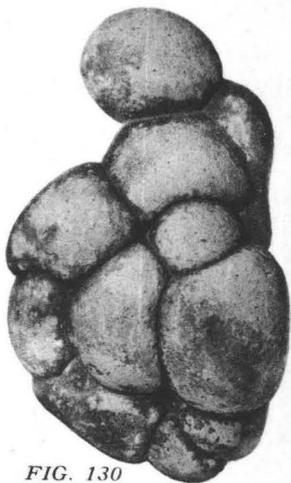


FIG. 130



FIG. 131



FIG. 132

PLANCHE XLII.

PLANCHE XLII.

Fig. 133. PHOSPHATE DE CHAUX $\times 50$]. Couche IV. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Fragments de tissu osseux.
- c.* Grains de quartz.
- d.* Gangue en calcite.

Fig. 134. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 40$]. Couche III. Chichaoua. Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés limpides.
- b, c.* Grains à structure différenciée.
- d.* Fragments de tissu osseux.
- e.* Éléments de quartz.
- f.* Gangue en calcite largement cristallisée.

Fig. 135. PHOSPHATE [$\times 50$]. Couche II. Chichaoua. Eocène. Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés limpides.
- b.* Grains pourvus d'une zone limpide à la périphérie.
- c.* Éléments phosphaté à structure concentrique.
- d.* Fragments de tissu osseux.
- e.* Grain phosphaté à noyau de quartz.
- f.* Grain phosphaté à noyau de calcite.
- g, h.* Nombreux éléments quartzeux dans le ciment.
- i.* Ciment en calcite.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XLII

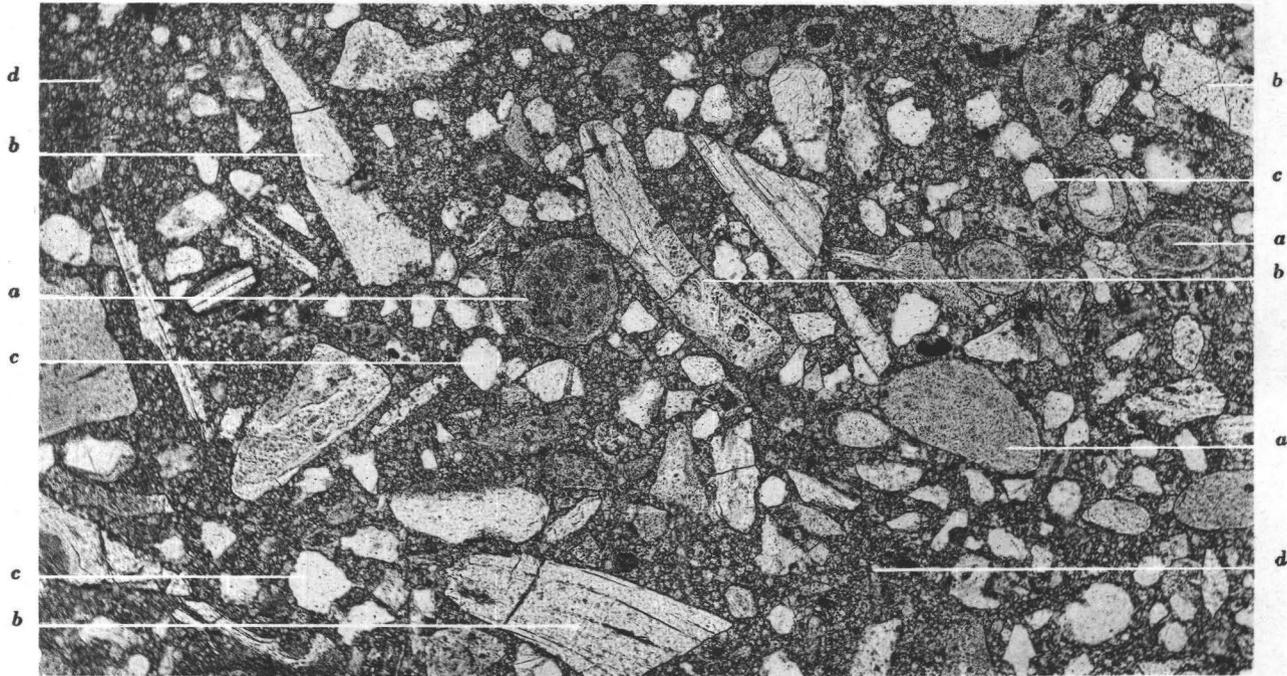


FIG. 133

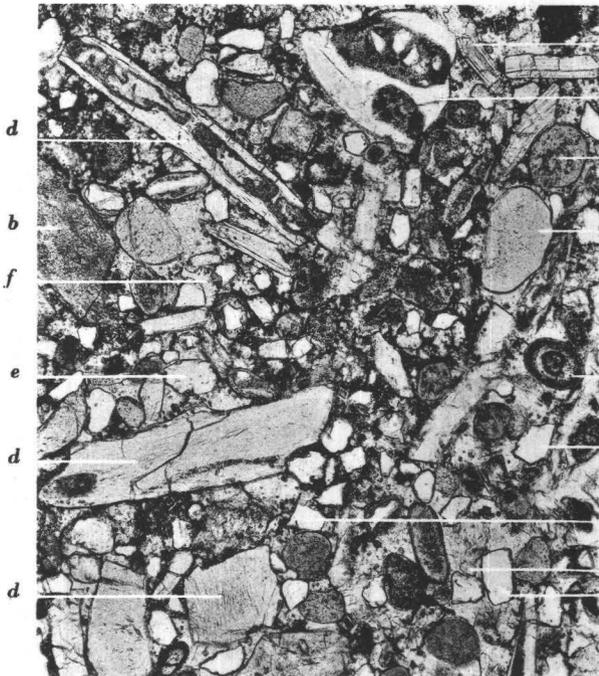


FIG. 134

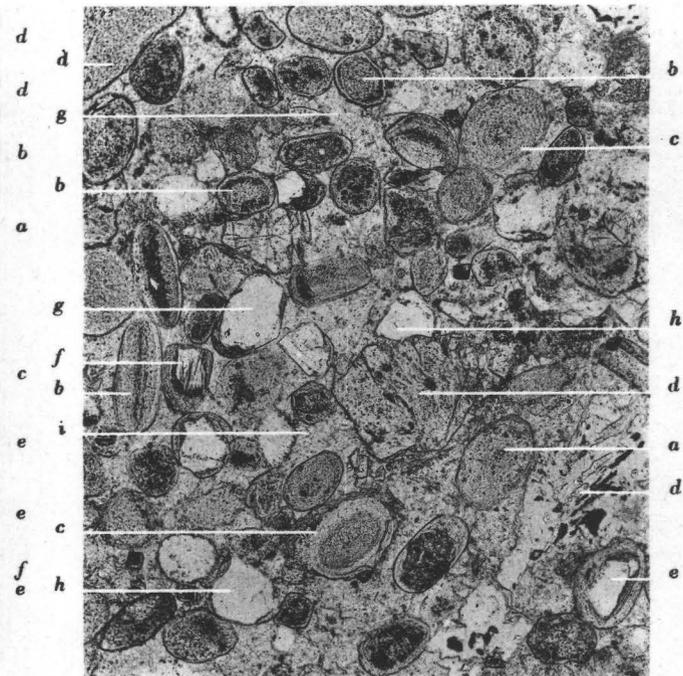


FIG. 135

PLANCHE XLIII.

PLANCHE XLIII.

Fig. 136. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 85$]. Couche I. Chichaoua. Eocène. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Grain de phosphate homogène.
- b.* Élément à structure concentrique.
- c.* Grain à noyau souillé par un résidu minéral.
- d.* Grain rendu entièrement opaque par un résidu minéral.
- e.* Association de deux grains entièrement différents.
- f.* Quartz détritique dans le ciment.
- g.* Quartz détritique dans un grain de phosphate.
- h.* Ciment en calcite rhomboédrique.

Fig. 137. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 50$]. Couche inférieure. Les Meskala Maëstrichtien. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés pareils à eux-mêmes dans toute leur épaisseur.
- b.* Grain à structure concentrique.
- c.* Élément phosphaté à noyau de quartz.
- d.* Fragment de tissu osseux.
- e.* Grains de quartz détritique du ciment.
- f.* Ciment calcaire.

Fig. 138. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 170$]. Surface de la couche supérieure. Les Meskala. Eonummulitique. Maroc occidental.

- a.* Débris anguleux de tissu osseux.
- b.* Grains de phosphate.
- c.* Grains de quartz.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XLIII

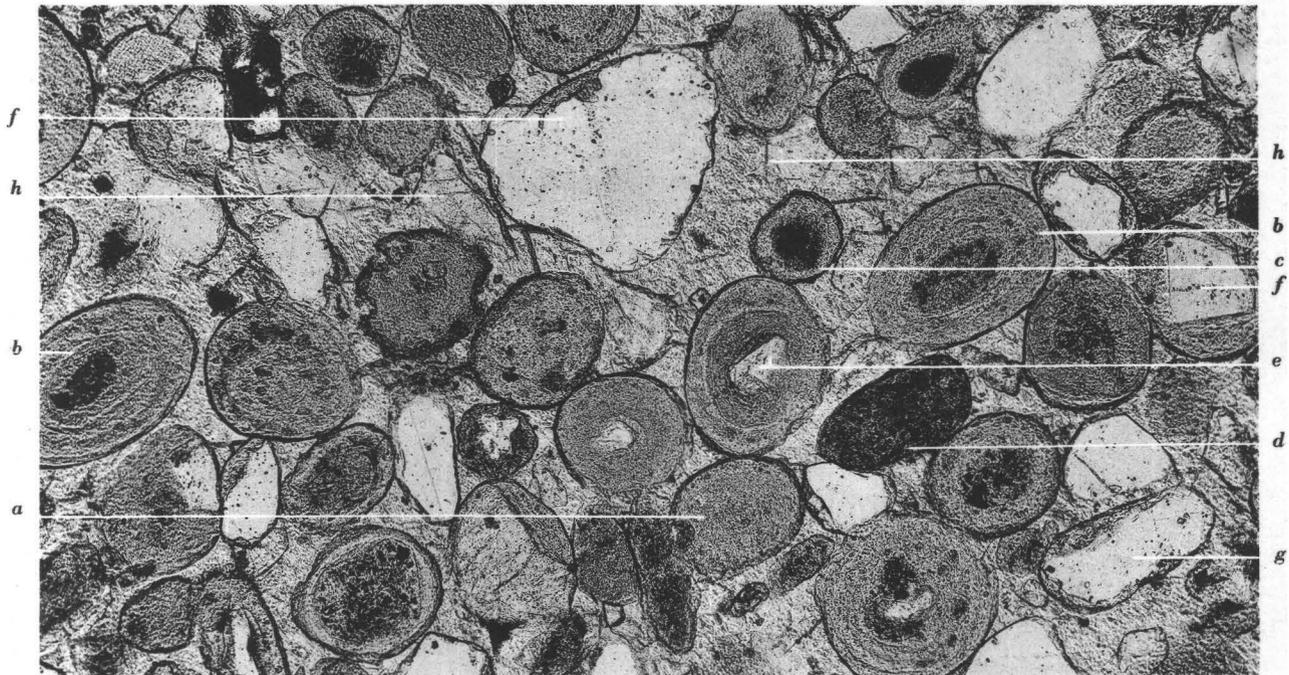


FIG. 136

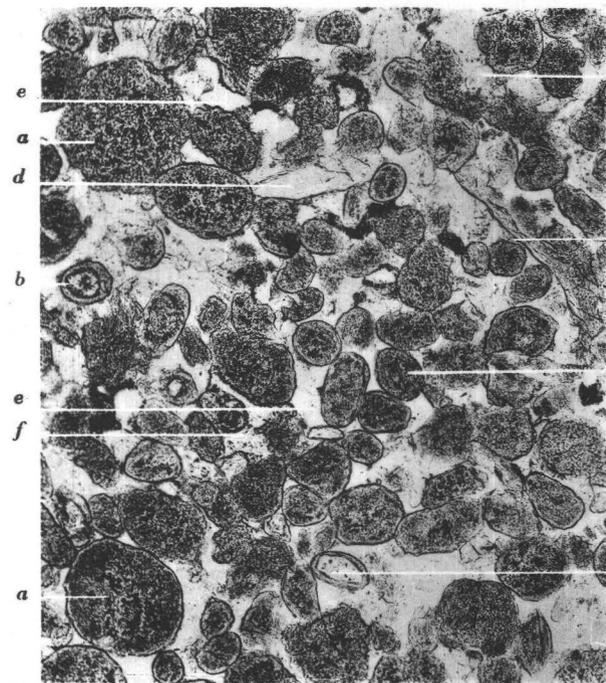


FIG. 137

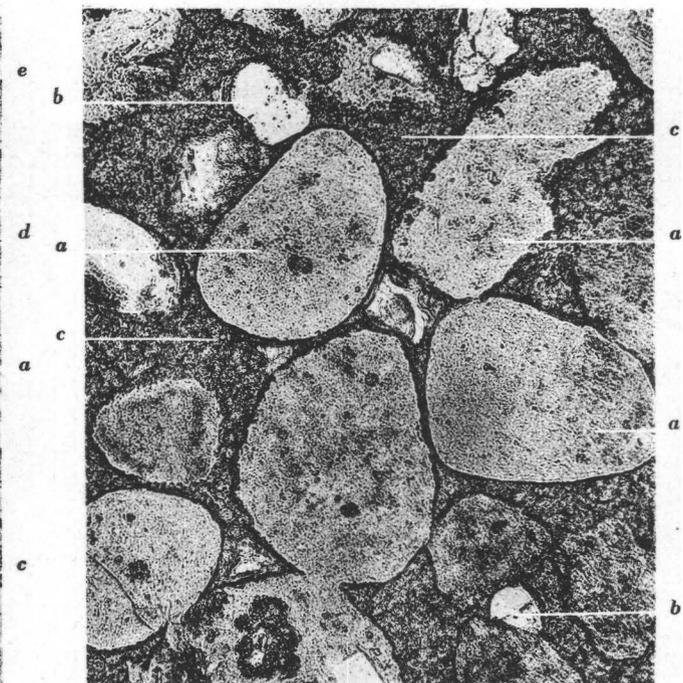


FIG. 138

PLANCHE XLIV.

PLANCHE XLIV.

Fig. 139. BRÈCHE OSSIFÈRE AU-DESSOUS D'UN GROS BANC DE SILEX [$\times 40$]. Les Meskala. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Débris anguleux de tissu osseux.
- b.* Grains de phosphate.
- c.* Grains de quartz.
- d.* Opale indifférenciée.

Fig. 140. SILEX PHOSPHATÉ [$\times 50$]. Les Meskala. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés indifférenciés, chargés d'impuretés.
- b.* Grains dont les impuretés se groupent en couronne.
- c.* Éléments phosphatés à débris de microplankton.
- d.* Fragments de tissu osseux.
- e.* Grains de quartz.
- f.* Ciment en calcédonite microcristalline.

Fig. 141. SILEX PHOSPHATÉ [$\times 120$]. Les Meskala. Région méridionale du Maroc occidental.

- a.* Grains phosphatés faiblement corrodés.
- b.* Grains profondément corrodés.
- c.* Ciment de calcédonite microcristalline.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XLIV

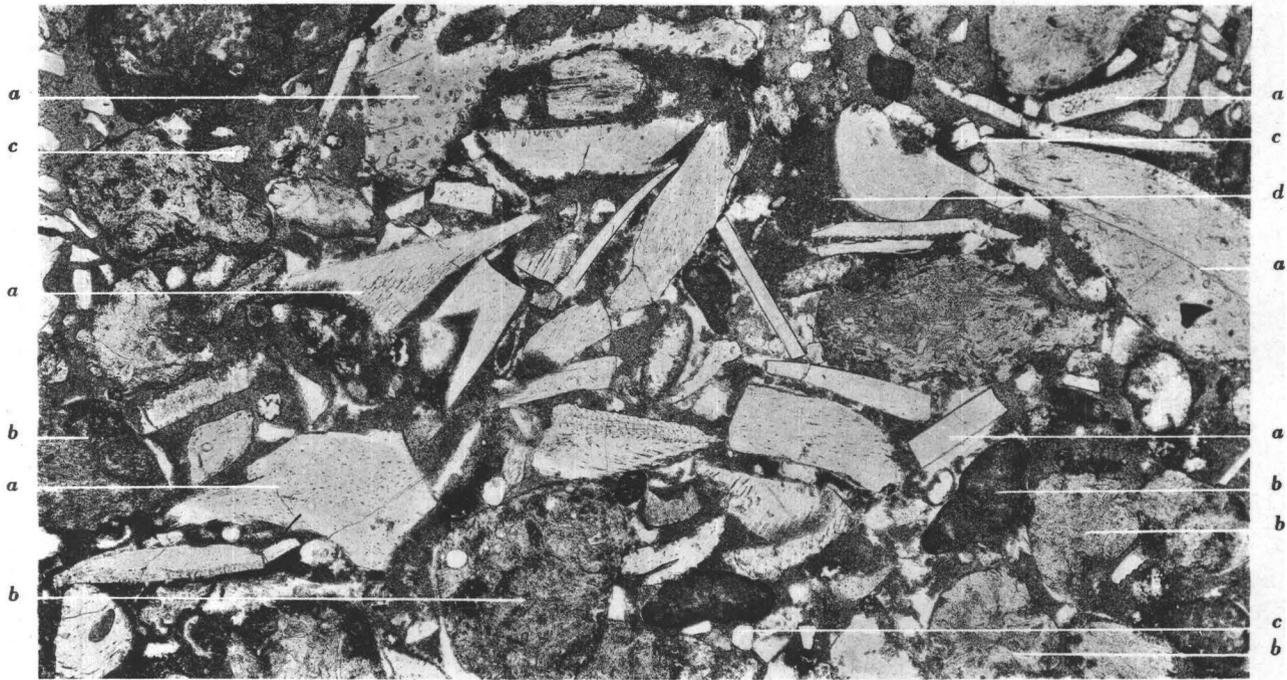


FIG. 139

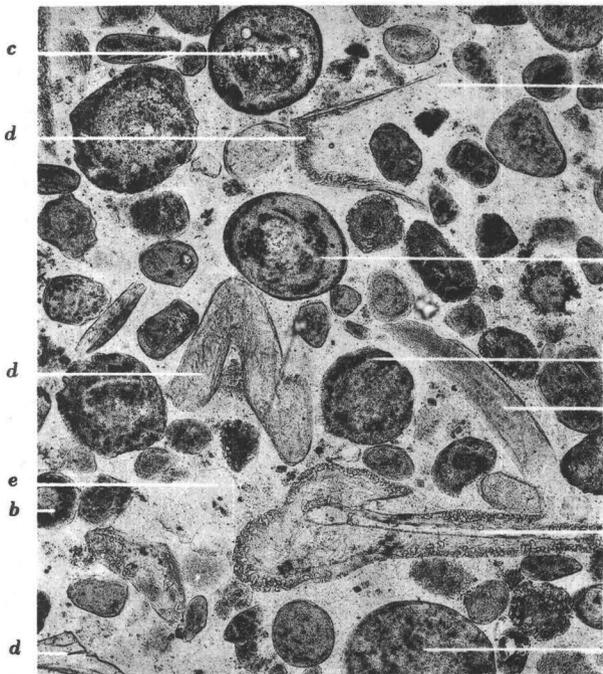


FIG. 140

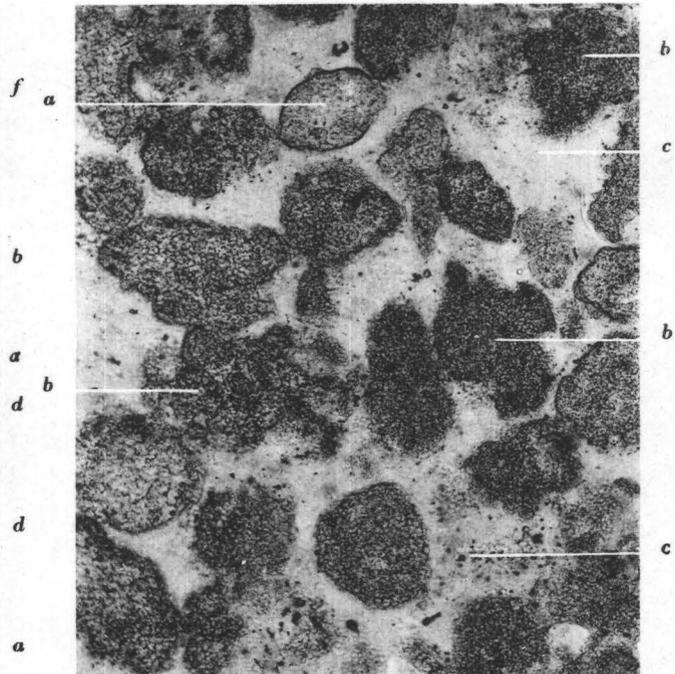


FIG. 141

PLANCHE XLV.

PLANCHE XLV.

Fig. 142. PHOSPHATE [$\times 40$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène. Atlas de Marrakech.

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Fragments de tissu osseux.
- c.* Ciment calcaire.

Fig. 143. PHOSPHATE SILICIFIÉ [$\times 65$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène. Atlas de Marrakech.

- a.* Grains phosphatés à inclusions brunes indéterminables.
- b.* Fragments de tissu osseux.
- c.* Coprolithes.
- d.* Gangue silicifiée, cryptocristalline.

Fig. 144. PHOSPHATE GLAUCONIEUX [$\times 60$]. Couche phosphatée. Médinet. Eocène (Maroc).

- a.* Grains de glauconie.
- b.* Grains de quartz.
- c.* Plage de ciment riche en Coccolithes.
- d.* Ciment où les microorganismes font défaut.
- e.* Veinules de pyrite altérée.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XLV

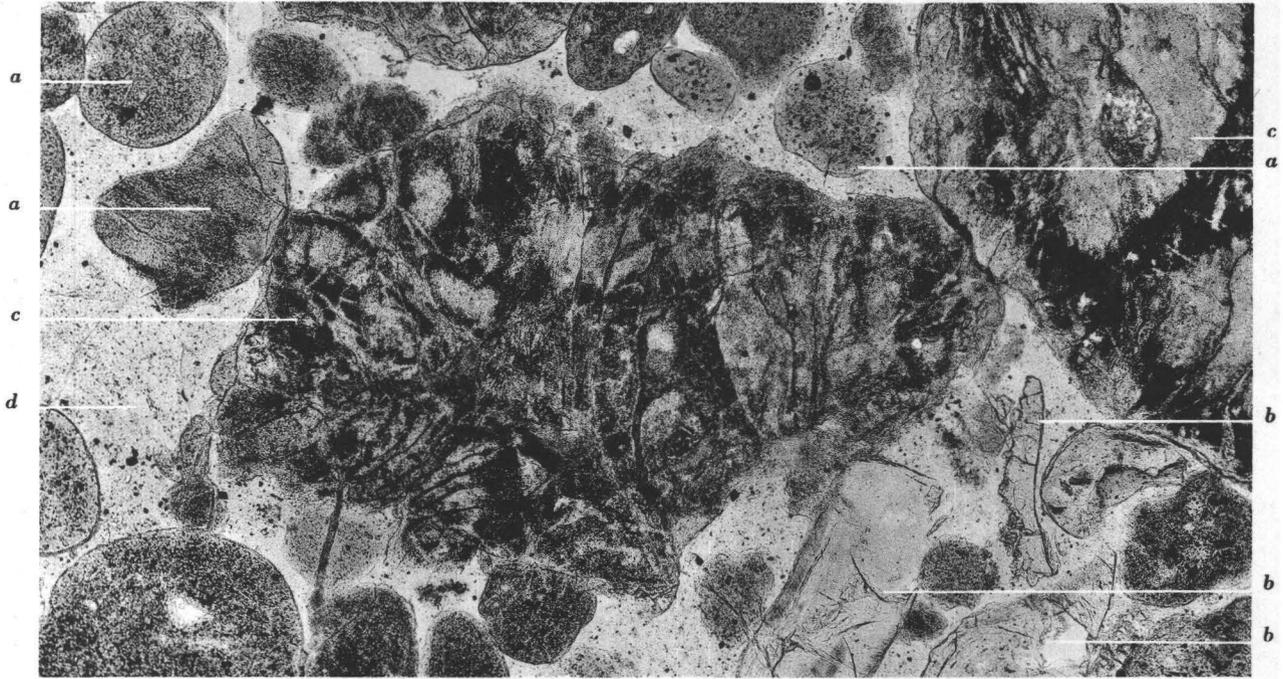


FIG. 143

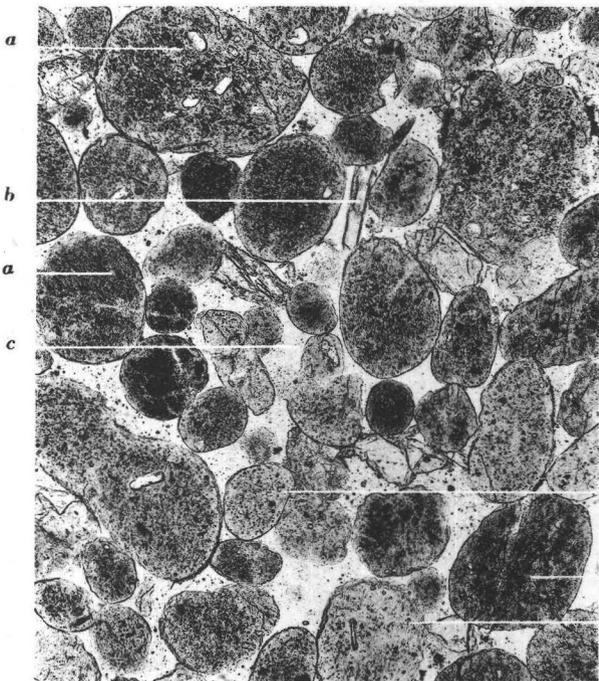


FIG. 142

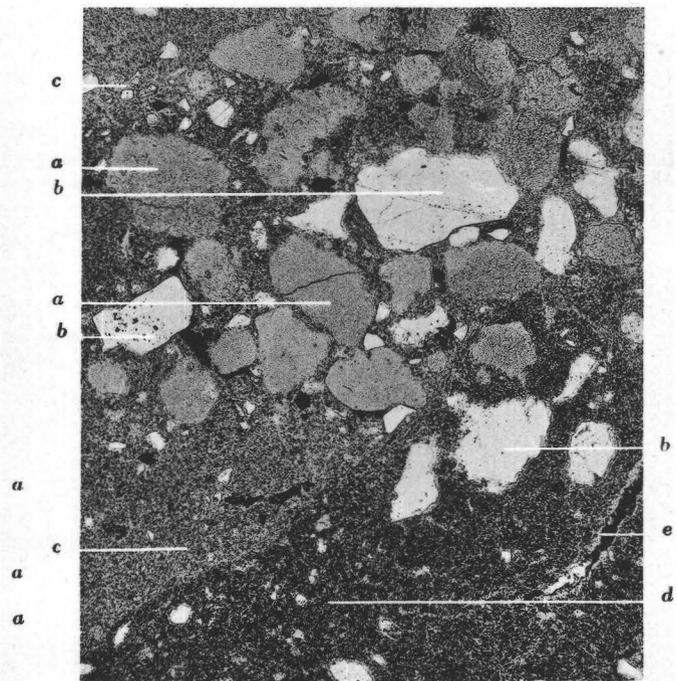


FIG. 144

PLANCHE XLVI.

PLANCHE XLVI.

Fig. 145. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 50$]. Agadour. Gisement de Kik. Atlas de Marrakech.

- a.* Grains phosphatés limpides.
- b.* Quartz.
- c.* Gangue calcaire.

Fig. 146. PHOSPHATE [$\times 170$]. Agadour. Gisement de Kik. Atlas de Marrakech.

- a.* Grain de phosphate riche en inclusions de Diatomées.

Fig. 147. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 35$]. Couche phosphatée. Plateau de Kik. Atlas de Marrakech.

- a.* Grains phosphatés isolés dans la gangue.
- b.* Gangue calcaire à pâte crayeuse.

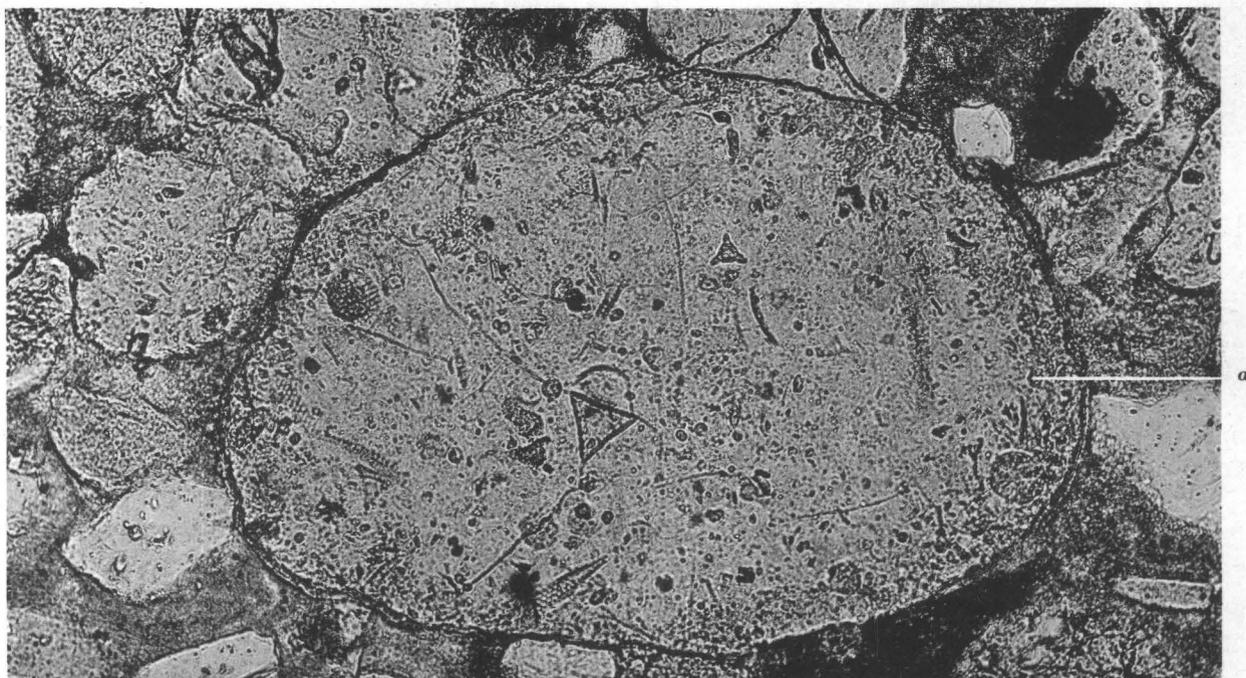


FIG. 146

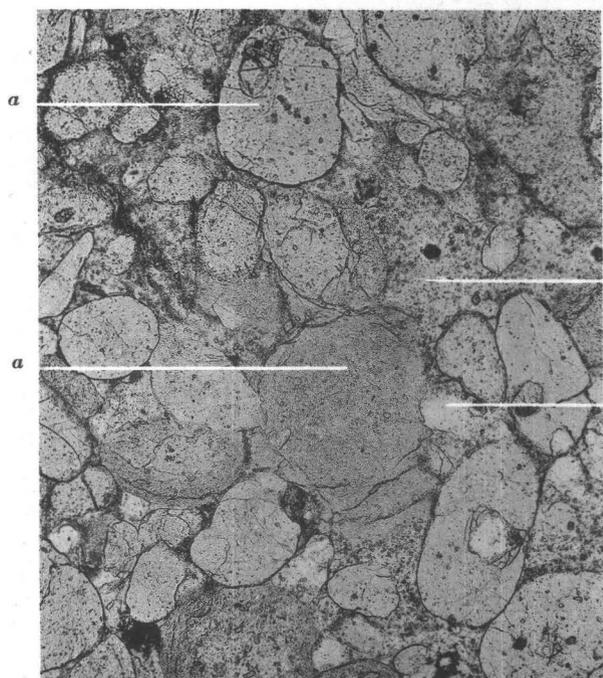


FIG. 145

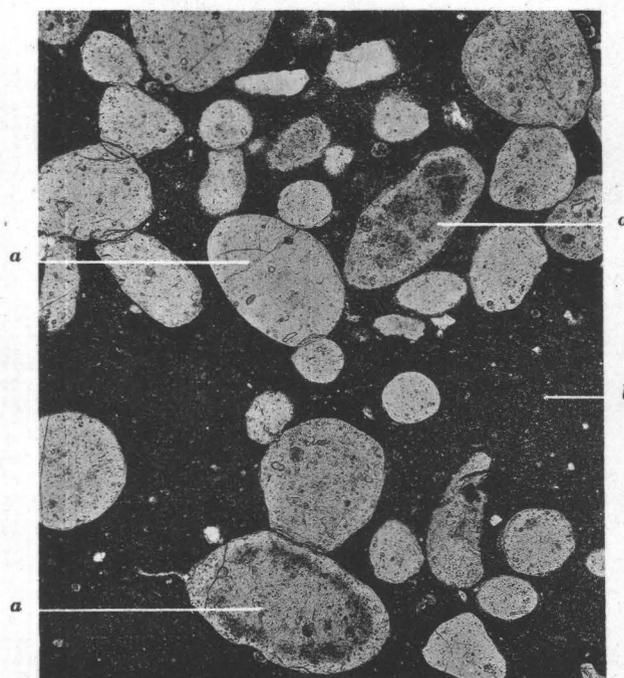


FIG. 147

PLANCHE XLVII.

PLANCHE XLVII.

Fig. 148. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 40$]. Plateau de Thamdaklit. Eocène de Timelit (Maroc).

- a.* Grains phosphatés simples, à fines inclusions poussiéreuses.
- b.* Éléments phosphatés complexes.
- c.* Inclusions de quartz.
- d.* Inclusions de grains phosphatés à auréole limpide.
- e.* Ciment calcaire à grain très fin.

Fig. 149. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 50$]. Daoualel. Mauritanie.

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Rhomboédres de calcite.

Fig. 150. CALCAIRE PHOSPHATÉ [$\times 70$]. Daoualel. Mauritanie.

- a.* Trame de calcite.
- b.* Rhomboédres de calcite à trame d'impuretés.

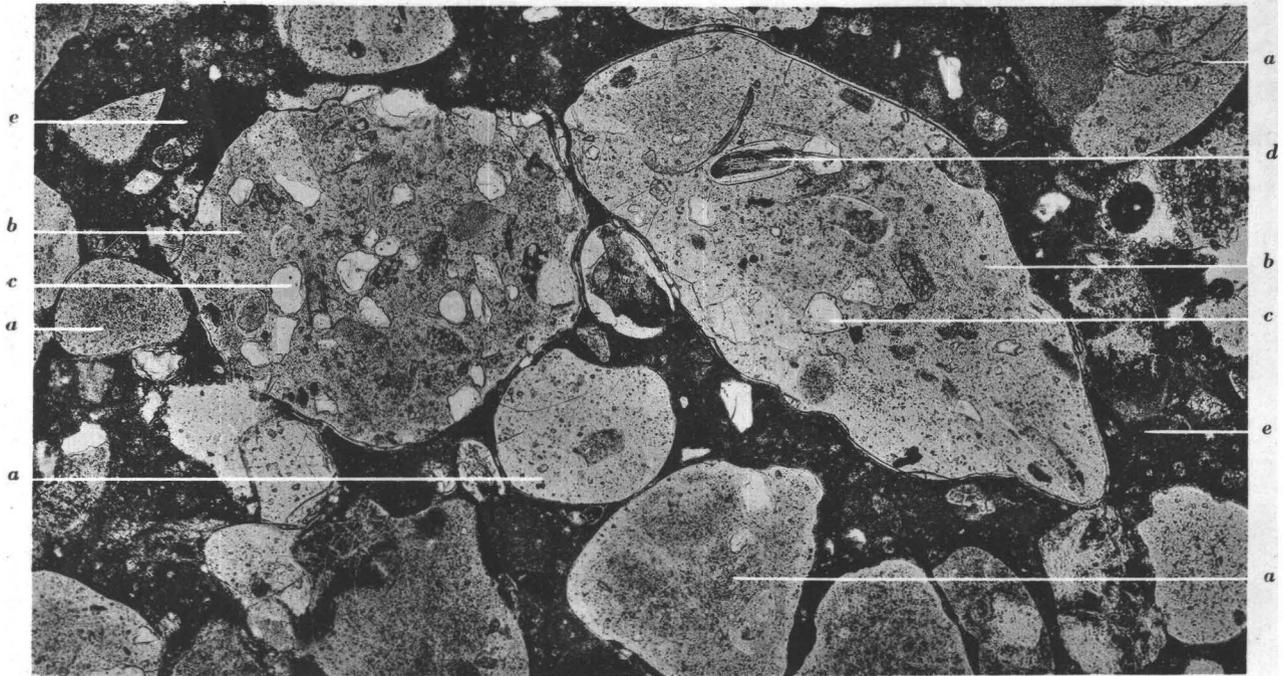


FIG. 148

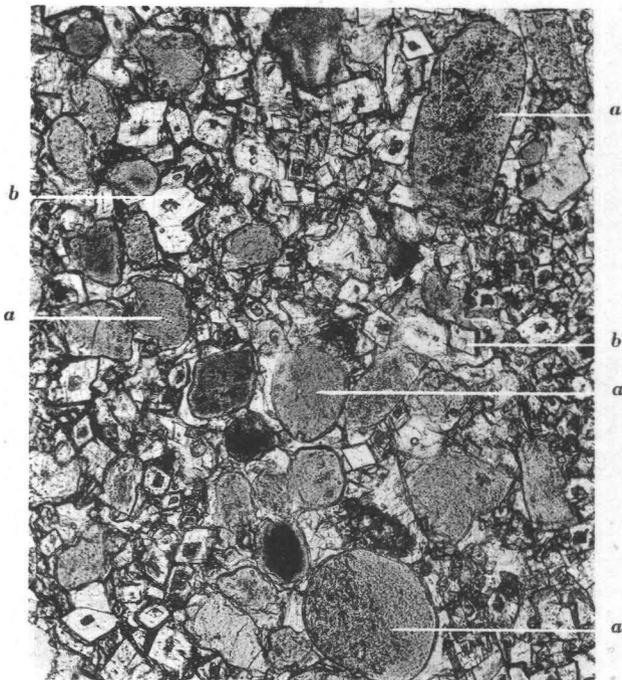


FIG. 149

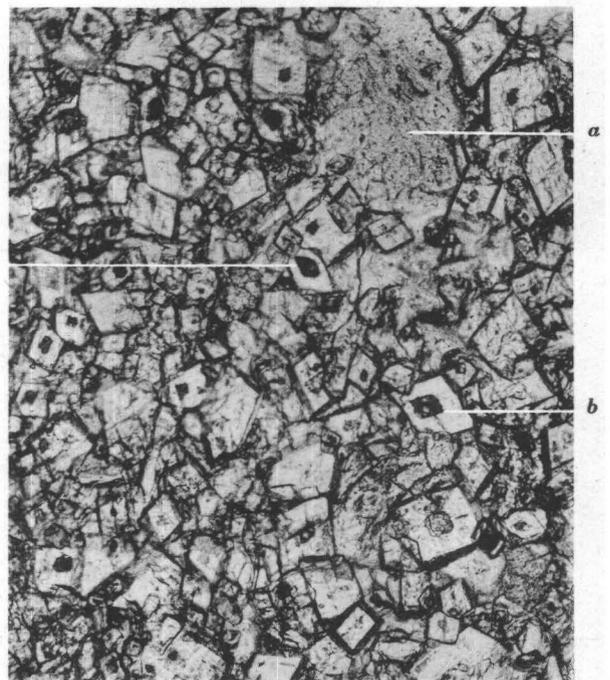


FIG. 150

PLANCHE XLVIII.

PLANCHE XLVIII.

Fig. 151. PHOSPHATE QUARTZEUX [$\times 50$]. Daoualel. Mauritanie.

- a.* Éléments phosphatés limpides.
- b.* Grains très opaques à zone périphérique limpide.
- c.* Grains de quartz.
- d.* Ciment en calcite largement cristallisée.

Fig. 152. PHOSPHATE DE CHAUX [$\times 50$]. Civé. Mauritanie.

- a.* Grains phosphatés arrondis.
- b.* Grains phosphatés anguleux.
- c.* Ciment représenté par une argile brune.

Fig. 153. SILEX PHOSPHATÉ À GLOBIGÉRINES [$\times 50$]. Sébikatane. Sénégal.

- a.* Globigérines.
- b.* Matériaux phosphatés.
- c.* Gangue en calcédonite cryptocristalline.

Fig. 154. PHOSPHATE GRUMELEUX [$\times 50$]. M'Pallo. Cercle Thiès. Sénégal.

- a.* Fond d'un grain phosphaté formé de petits nodules de phosphate amorphe.
- b.* Cavités irrégulières.
- c.* Couronne du grain, formée d'un phosphate très opaque.
- d.* Perles irrégulières de phosphate dans le ciment.
- e.* Calcédonite cryptocristalline.

PHOSPHATES DE CHAUX SÉDIMENTAIRES

Pl. XLVIII

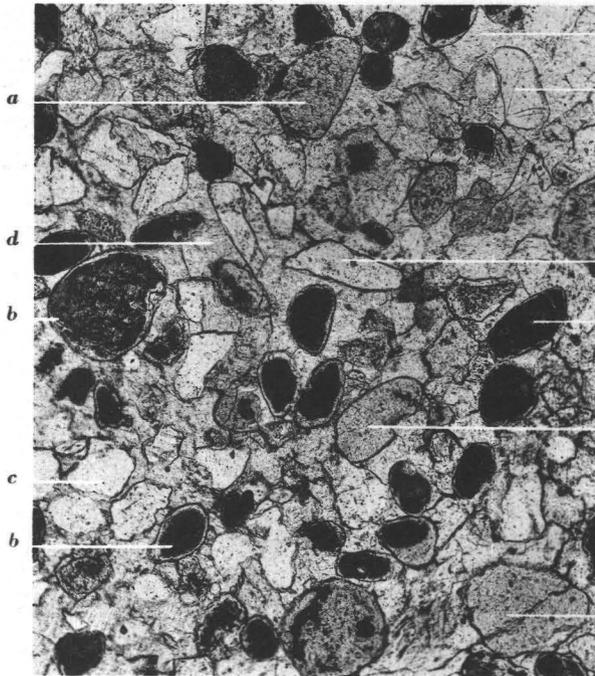


FIG. 151

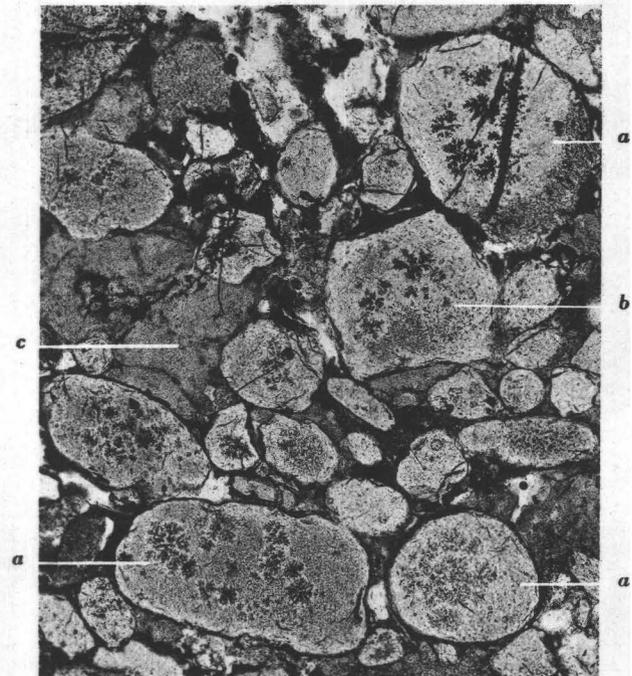


FIG. 152

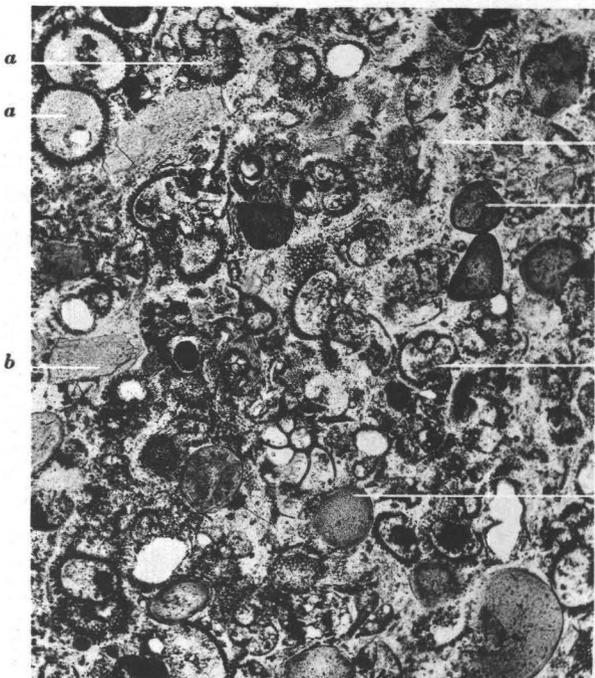


FIG. 153



FIG. 154

PLANCHE XLIX.

PLANCHE XLIX.

Fig. 155. PHOSPHATE GRUMELEUX [$\times 60$]. M'Pallo. Cercle Thiès (Sénégal).

- a.* Grumeaux phosphatés.
- b.* Rognons phosphatés.
- c.* Silice cryptocristalline.

Fig. 156. PHOSPHATE SILICIFIÉ [$\times 40$]. M'Pando (Gabon).

- a.* Grains limpides à contour arrondi.
- b.* Grains subanguleux.
- c.* Silice secondaire.
- d.* Gangue formée d'opale et calcédonite cryptocristalline.
- e.* Grains de quartz.

Fig. 157. PHOSPHATE SILICIFIÉ À FORAMINIFÈRES [$\times 50$]. Lagune Iguela (Gabon).

- a.* Grains de phosphate.
- b.* Test de Foraminifère.
- c.* Foraminifère transformé en un nid de calcédonite.
- d.* Ciment en opale globulaire associée à de la calcédonite.

Fig. 158. PHOSPHATE SILICIFIÉ À FORAMINIFÈRES [$\times 80$]. Lagune Iguela (Gabon).

- a.* Grains phosphatés.
- b.* Test de *Cristellaria*.
- c.* Opale globulaire.
- d.* Calcédonite.

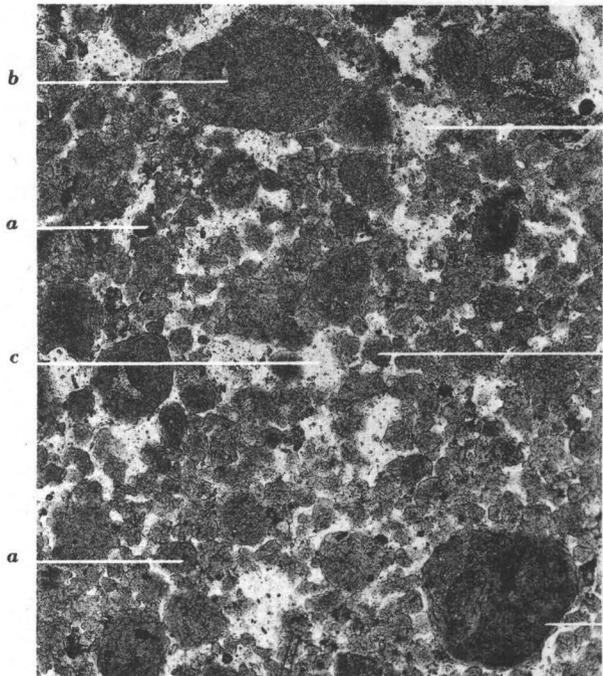


FIG. 155

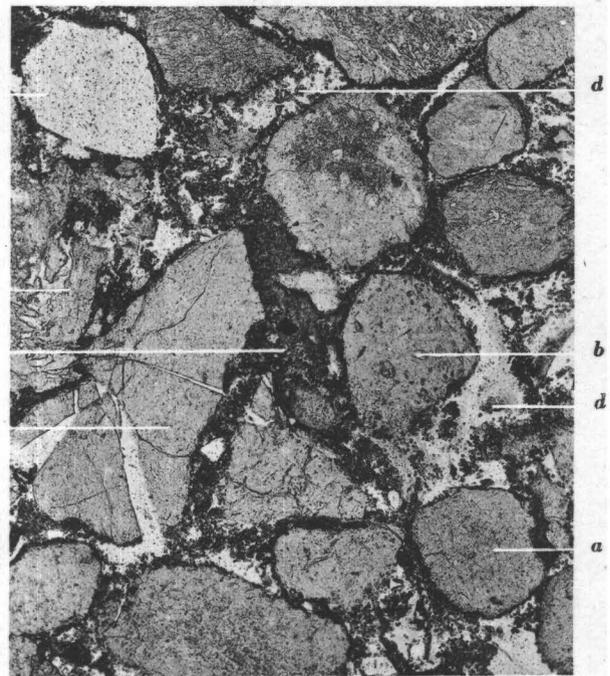


FIG. 156

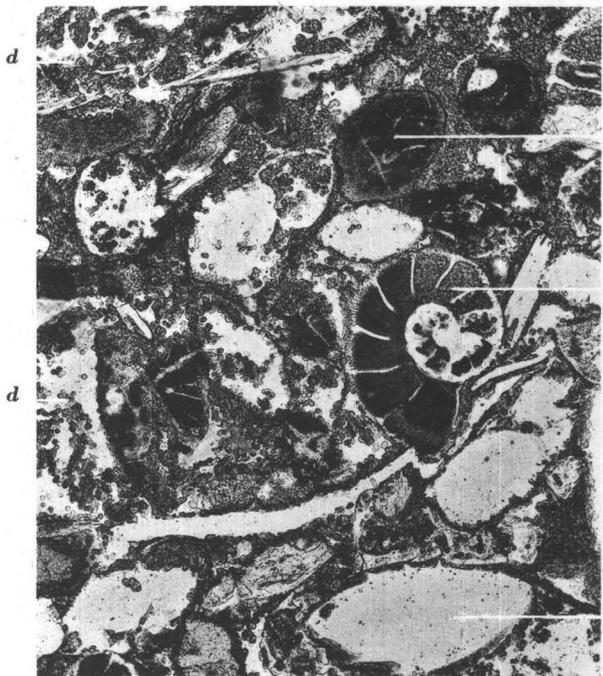


FIG. 157

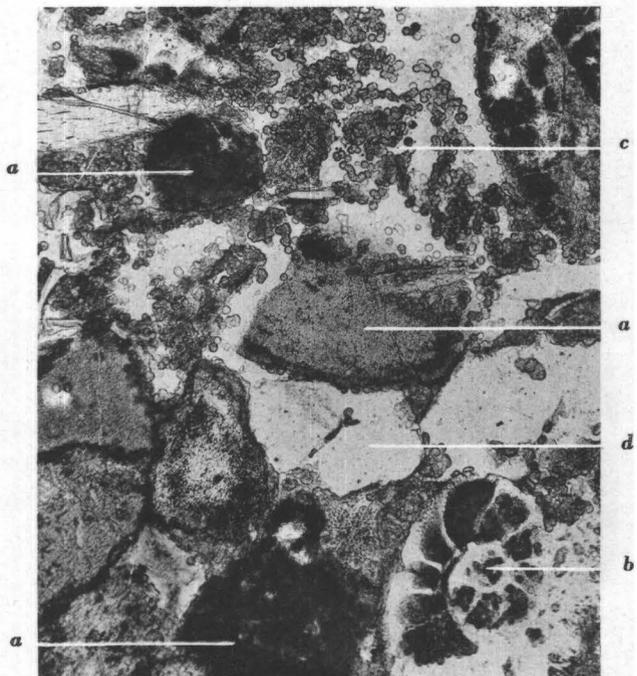


FIG. 158

PLANCHE L.

PLANCHE L.

Fig. 159. PHOSPHATE SILICIFIÉ [$\times 50$]. Région de Kola (Moyen-Congo).

- a.* Grains phosphatés.
- b, c, d.* Fragments de carapace de Crustacés.
- e.* Grains de quartz.
- f.* Gangue siliceuse formée de quartz microgrenu et de calcédonite.

Fig. 160. PHOSPHATE SILICIFIÉ [$\times 100$]. Région de Kola (Moyen-Congo).

- a, b, c.* Fragments de carapace de Crustacés.
- d.* Grain de quartz.
- e.* Élément phosphaté.
- f.* Ciment de calcédonite et de quartz microgrenu.

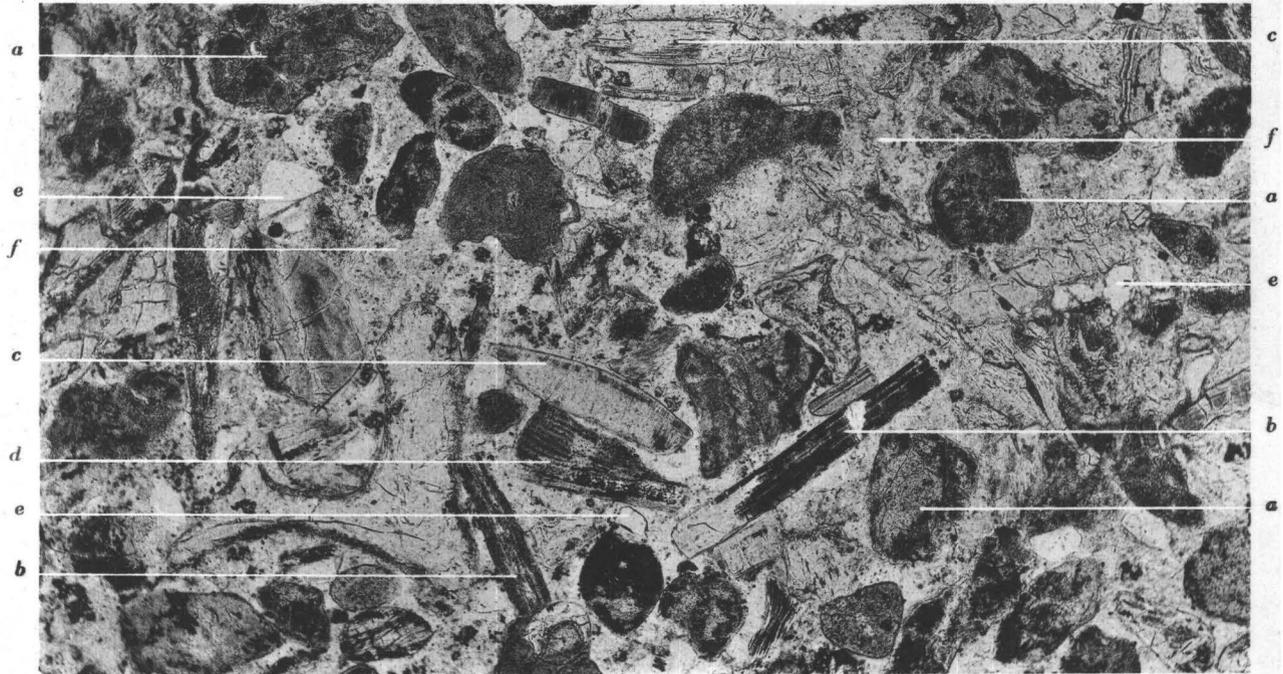


FIG. 159



FIG. 160

PLANCHE LI.

PLANCHE LI.

NODULES DE L'AGULHAS BANK.

Fig. 161. Nodule profondément échancré.

Fig. 162. Nodule orné de protubérances.

Fig. 163. Forme arrondie.

Fig. 164. Forme mamelonnée, perforée de nombreuses cavités.

Fig. 165. Nodule d'aspect tuberculeux et scoriacé.

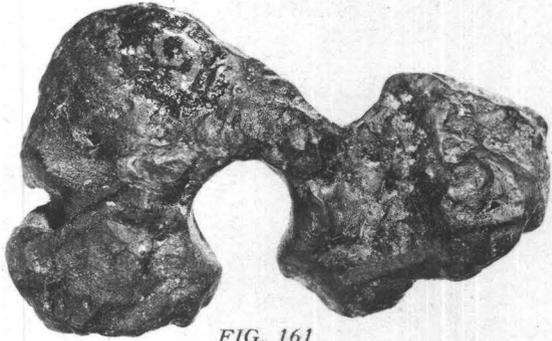


FIG. 161

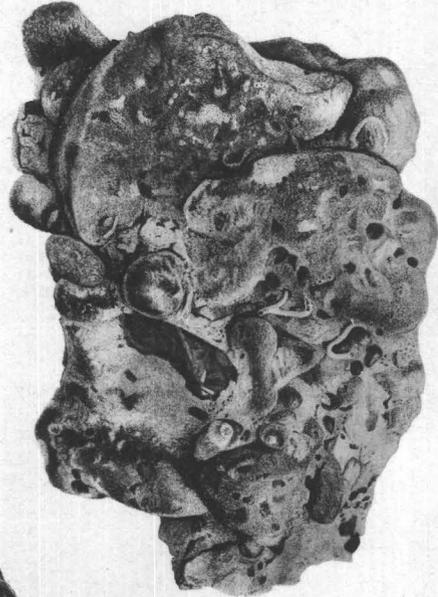


FIG. 164



FIG. 163

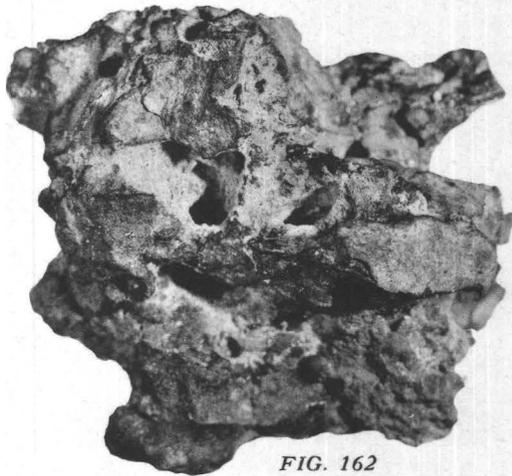


FIG. 162

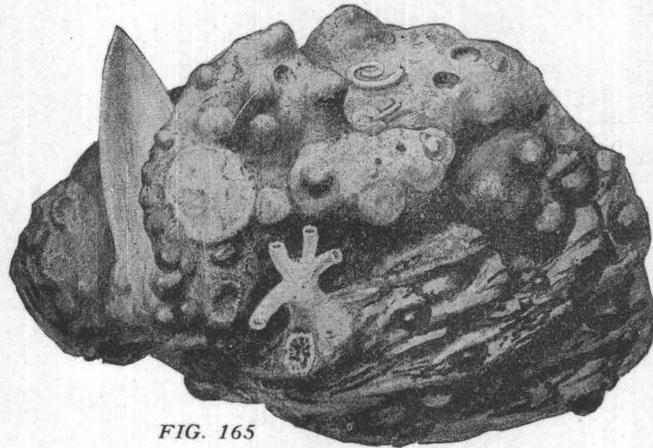


FIG. 165

PLANCHE LII.

PLANCHE LII.

Fig. 166. NODULE CALCARÉO-PHOSPHATÉ TRÈS QUARTZEUX [$\times 50$]. Agulhas Bank.

- a.* Grains de quartz.
- b.* Glauconie.
- c.* Globigérines.
- d.* Ciment calcaréo-phosphaté.

Fig. 167. NODULE CALCARÉO-PHOSPHATÉ TRÈS GLAUCONIEUX [$\times 45$]. Agulhas Bank.

- a.* Grains de quartz.
- b.* Glauconie.
- c.* Globigérines.
- d.* Ciment calcaréo-phosphaté.

Fig. 168. NODULE CALCARÉO-PHOSPHATÉ À BRYOZAIRES ET PULVINULINES [$\times 50$]. Agulhas Bank.

- a.* Débris de Bryozoaires.
- b.* Pulvinulines.
- c.* Ciment calcaréo-phosphaté.

Fig. 169. NODULE CALCARÉO-PHOSPHATÉ PÉTRI DE GLOBIGÉRINES [$\times 50$]. Agulhas Bank.

- a.* Grains de quartz.
- b.* Globigérines.
- c.* Spicules d'Éponges.

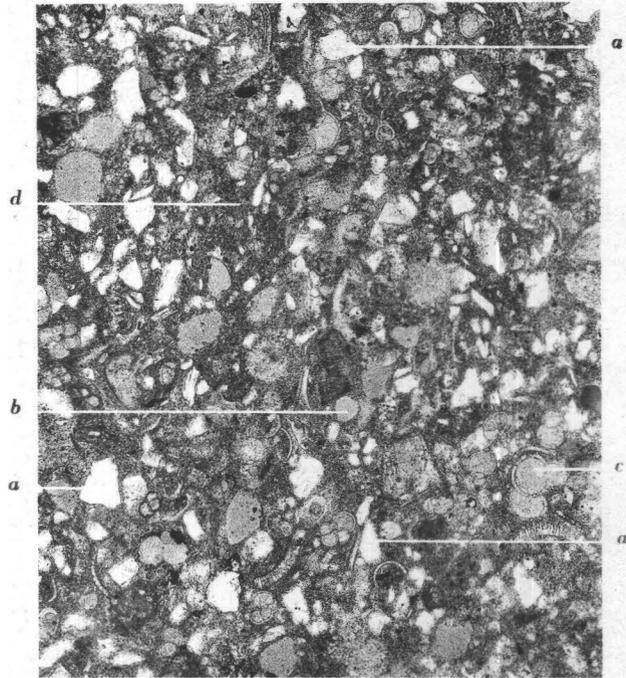


FIG. 166

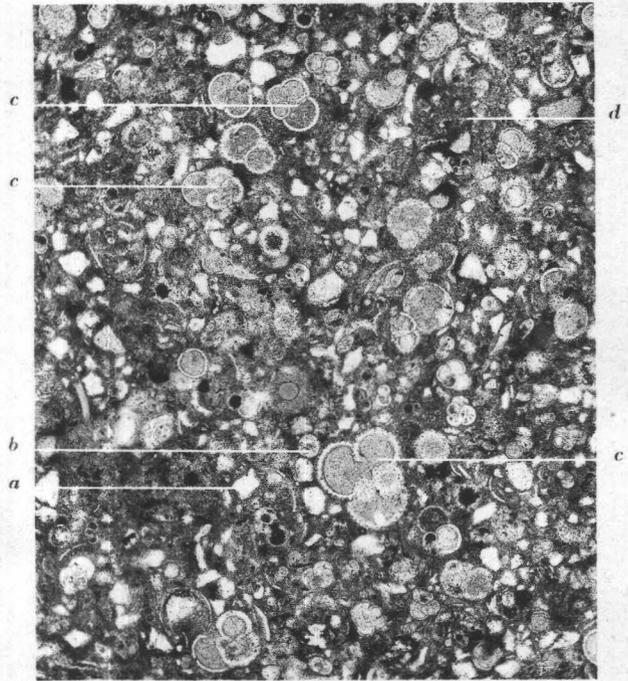


FIG. 167

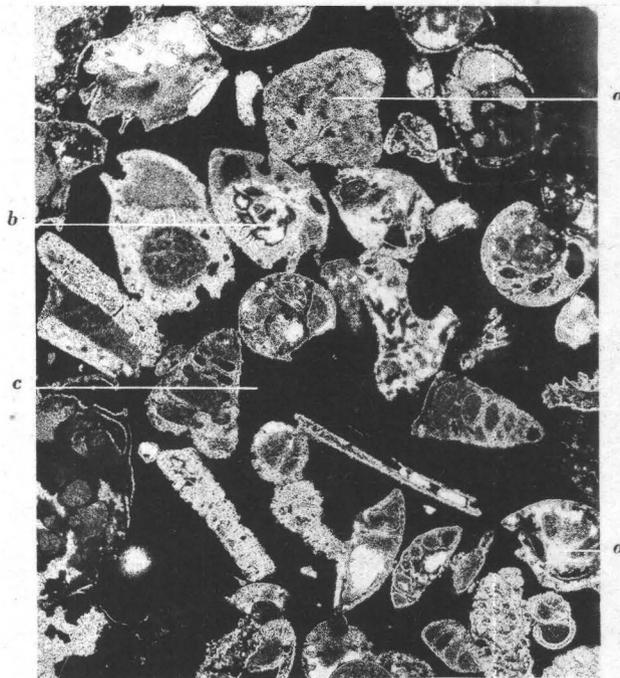


FIG. 168

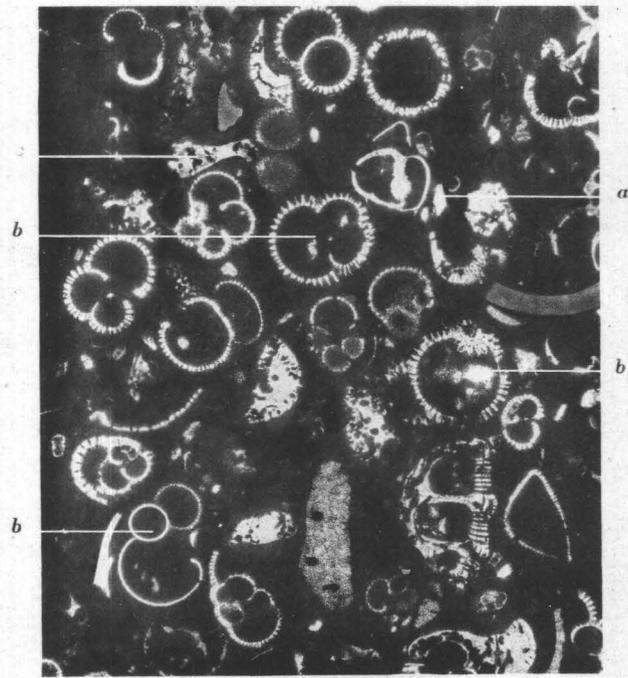


FIG. 169

PLANCHE LIII.

PLANCHE LIII.

Fig. 170. NODULE PHOSPHATÉ FERRUGINEUX À GLOBIGÉRINES [$\times 60$]. Agulhas Bank.

- a.* Globigérines.
- b.* Quartz.
- c.* Perforation remplie d'oxyde de fer.
- d.* Gangue phosphatée et ferrugineuse.

Fig. 171. NODULE DE SABLE VERT PHOSPHATÉ [$\times 50$]. Agulhas Bank.

- a.* Volumineux grain de glauconie.
- b.* Grains de quartz.
- c.* Ciment en phosphate de chaux cryptocristalline.

Fig. 172. NODULE FORMÉ DE DEUX ROCHES DIFFÉRENTES [$\times 45$]. Agulhas Bank.

- a.* Première moitié du nodule, roche à Foraminifères.
- b.* Seconde moitié du nodule, roche à grains de glauconie volumineux.
- c.* Grains de quartz de grande taille.
- d.* Foraminifères benthiques à test épais.
- e.* Zone de contact des deux roches.

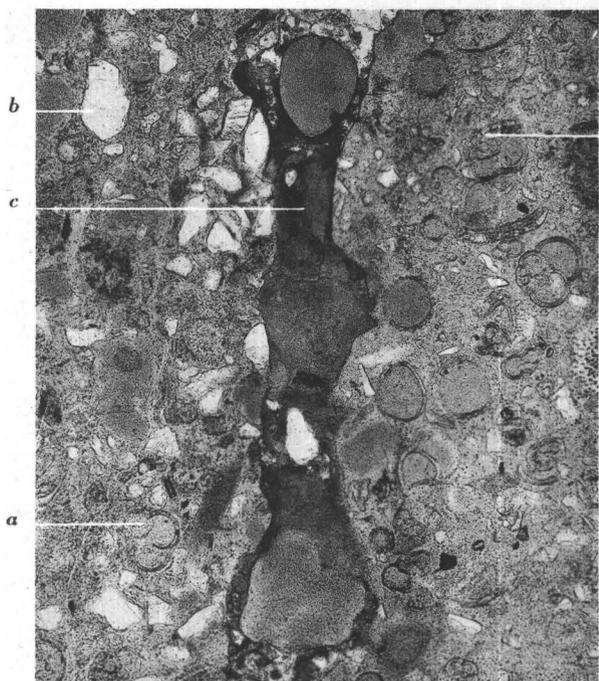


FIG. 170

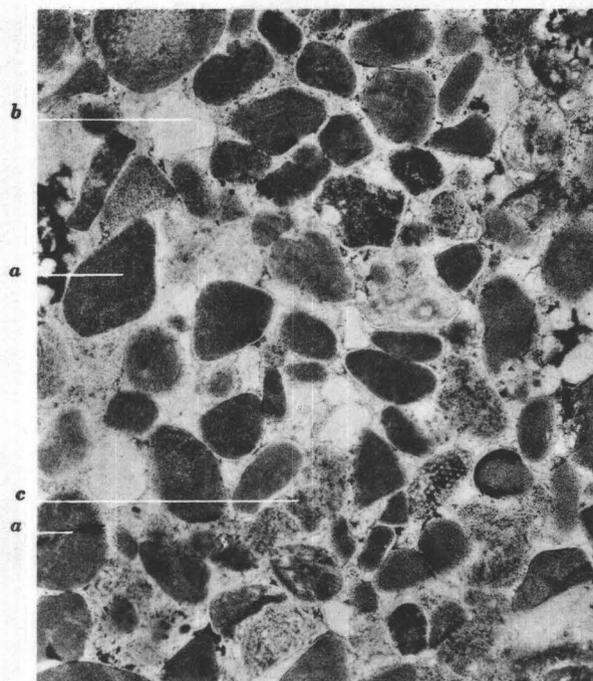


FIG. 171

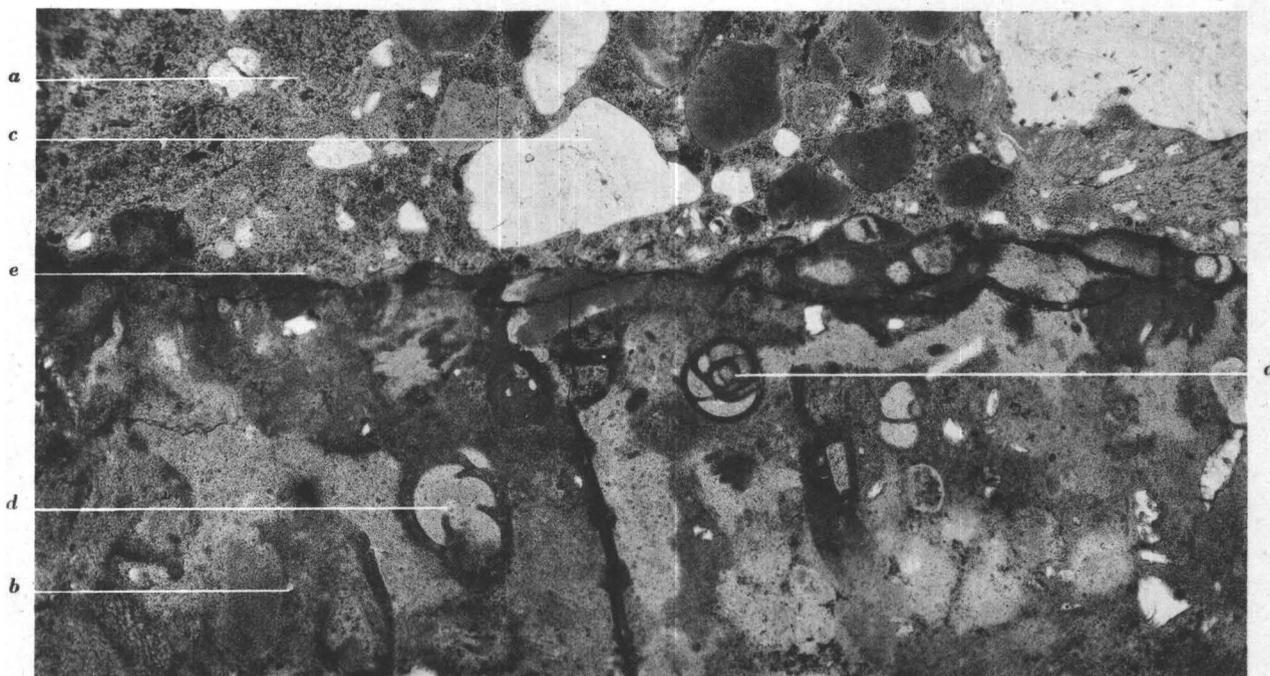


FIG. 172

PLANCHE LIV.

PLANCHE LIV.

MICROPHOTOGRAPHIES EXÉCUTÉES EN LUMIÈRE INFRA-ROUGE ET METTANT EN ÉVIDENCE DES BACTÉRIES FOSSILES.

Fig. 173. PHOSPHATE DE CHAUX ORDOVICIEN (PAYS-DE-GALLES).

- a.* Bactéries en forme de sphérules, isolées.
- b.* Bactéries en forme de sphérules, rassemblées en files rectilignes.

Fig. 174. NODULE PHOSPHATÉ CÉNOMANIEN DU BASSIN DE PARIS (PERNES-EN-ARTOIS).

- a.* Bactéries en forme de sphérules, isolées.
- b.* Bactéries en forme de sphérules, groupées en petits amas irréguliers.

Fig. 175. PHOSPHATE DE CHAUX NORD-AFRICAINE. COUCHE I. SIÈGE DE BOU-JNIBA, KOURIGHA (MAROC).

- a.* Bactéries en forme de sphérules, isolées.
- b.* Bactéries en forme de sphérules, groupées en amas irréguliers.

Fig. 176. NODULES PHOSPHATÉ DE L'AGULHAS-BANK.

- a.* Bactéries en forme de sphérules, isolées.

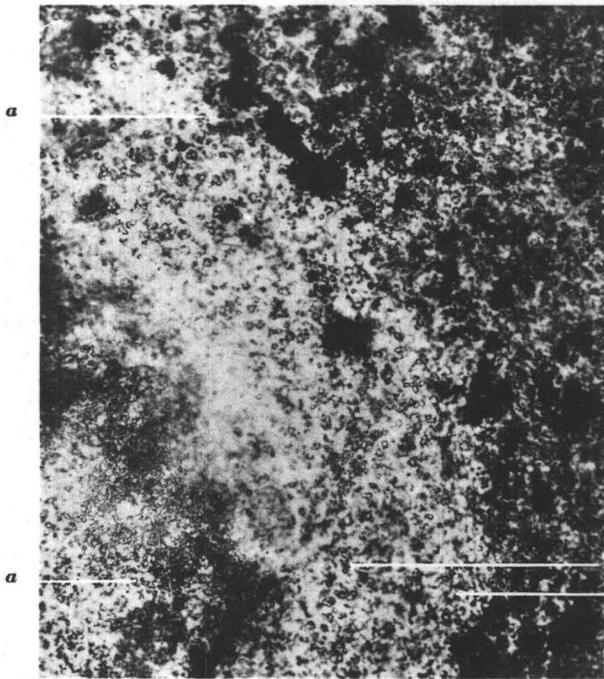


FIG. 173

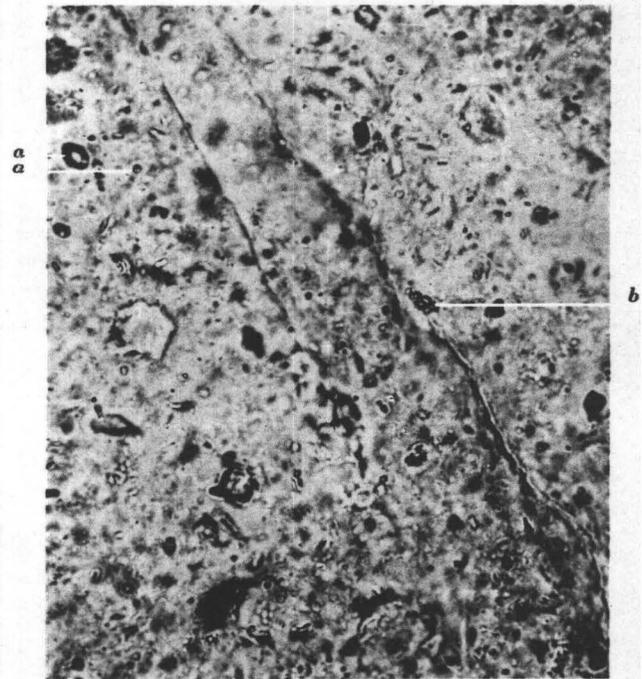


FIG. 174

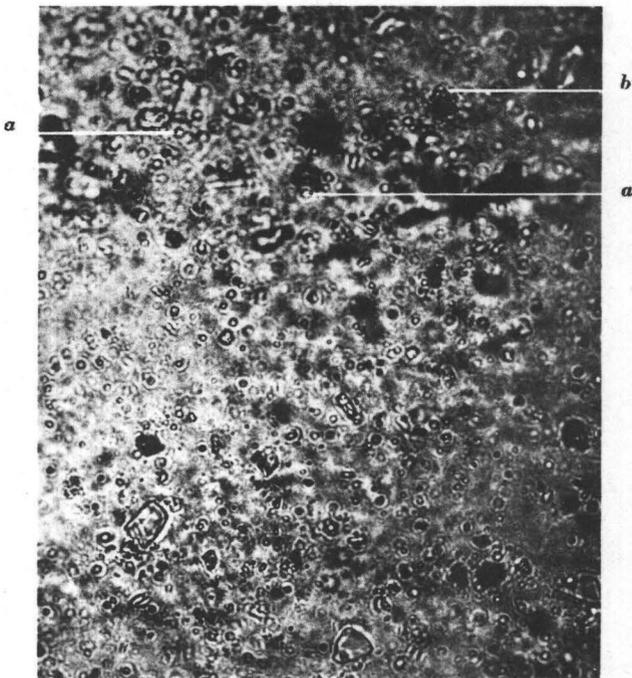


FIG. 175

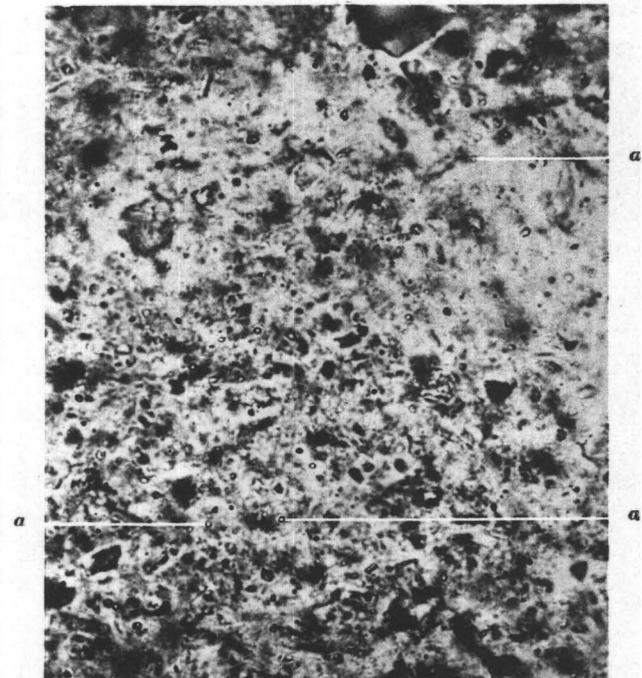


FIG. 176