

BULLETIN
DE LA
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE
DE FRANCE

CETTE SOCIÉTÉ, ONDÉE LE 17 MARS 1830,
A ÉTÉ AUTORISÉE ET RECONNUE COMME ÉTABLISSEMENT D'UTILITÉ PUBLIQUE
PAR ORDONNANCE DU 3 AVRIL 1832.

QUATRIÈME SÉRIE

TOME VINGT-QUATRIÈME

FASCICULE 1-2

Feuilles 1-4. — Planche I.
26 figures dans le texte.



PARIS
SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE
28, rue Serpente, VI

COMpte DE chèques POSTAUX PARIS, N^o 173-72

1924



090 004215 4

LES MINÉRAIS DE FER OOLITHIQUE SECONDAIRES DE FRANCE

PAR **L. Cayeux**¹.

Les minerais de fer oolithique des temps secondaires font leur apparition, en France, dès l'époque hettangienne, où ils présentent une extension très réduite. Jamais les conditions ne furent plus favorables à leur développement et à leur diffusion qu'au Lias supérieur. C'est de cette période que datent les minerais de Lorraine, ainsi que toute une série de petits gisements mis en exploitation dans le Bassin de Paris, le Jura, le Mont d'Or lyonnais, les Cévennes et l'Aveyron.

Puis ils reparaissent, presque dénués d'intérêt pratique, au Jurassique moyen, pour reprendre une nouvelle extension considérable au Callovien, sans donner lieu à des concentrations, susceptibles d'être mises en valeur de nos jours. A l'Oxfordien, ils subissent une dernière régression, et c'est alors que disparaissent chez nous les derniers minerais de fer oolithique d'âge jurassique.

Après une longue interruption les minerais de type oolithique se retrouvent, d'une manière tout accidentelle, dans le Valangien marin du Jura et finalement dans le Barrémien de l'Est du Bassin de Paris, où ils se réclament d'un milieu qui n'a plus rien de marin. A partir de l'Aptien et surtout de l'Albien, les oolithes ferrugineuses disparaissent pour toujours en France et cèdent la place à une nouvelle combinaison ferrugineuse, la *glauconie*. Telle est, en gros, la répartition dans le temps de nos minerais de fer oolithique secondaires.

I. Matériaux des minerais de fer oolithique secondaires.

Les minerais de fer oolithique secondaires sont construits sur le même modèle que les minerais de fer oolithique paléozoïques. Ils renferment, en tant qu'éléments essentiels : des *minéraux*, des *oolithes*, accompagnées de *fausses oolithes*, des *organismes* et un *ciment*.

1. Cette note, présentée, résume les principales conclusions d'un volume qui vient de paraître sous le titre : Les minerais de fer oolithique de France. Fasc. I, minerais de fer secondaires (*Étude des Gîtes minéraux de la France*, 1922, 1051 p., 63 fig., et 35 planches hors texte).

MINÉRAUX. Le *quartz* clastique ne joue un rôle important que dans les minerais lorrains. Il manque dans la plupart des autres, et, dans le cas contraire, ses représentants sont de très petite taille.

Le *quartz* secondaire tient une grande place dans certains minerais lorrains, où il résulte d'une quartzification de la sidérose et parfois de la calcite.

La présence de la *sidérose* clastique est à souligner dans une série de minerais lorrains. Par une quartzification progressive, dont il est possible de suivre toutes les étapes, les grains de sidérose passent à des éléments faciles à confondre avec des grains de *quartz* détritique, si l'on ne prête point une attention toute particulière aux inclusions.

D'une manière générale, le *phosphore* y revêt trois manières d'être : 1. Concrétions microscopiques de phosphate de chaux dans quelques minerais bajociens, calloviens et oxfordiens, où il paraît dériver d'Alcyonaires ; 2. Débris de tissu osseux ; 3. Combinaison avec le fer, rendue invisible par les différents composés ferrugineux des oolithes, et jouant un grand rôle dans les minerais de Lorraine, en particulier. D'un bout à l'autre de la série, Barrémien non compris, les minerais oolithiques sont redevables de leur phosphore à l'activité organique.

OOLITHES. Toute oolithe ferrugineuse typique comporte une enveloppe corticale et un noyau. Par leurs changements de structure, de composition et d'épaisseur relative, ces deux éléments sont pour les oolithes une cause de variation presque sans limite. Dans la grande majorité des cas, le noyau est un corps étranger de nature minérale ou organique, et de volume très variable, par rapport à l'ensemble de l'oolithe.

Différents minéraux prennent part à la constitution des oolithes. Ce sont : la *calcite*, la *sidérose*, la *chlorite*, l'*hématite brune* et *rouge*, la *magnétite* et la *pyrite*. Par leur association en toutes proportions, au nombre de deux, trois et plus, ces minéraux font du groupe oolithique un ensemble infiniment divers. Dans une seule et même préparation de minerai oolithique valanginien de Métabief (Doubs) j'ai compté huit types d'oolithes de composition différente, en ne faisant appel qu'aux principaux.

L'oolithe hématisée est, par excellence, l'oolithe caractéristique des minerais secondaires. Pour plus de précision, observons que c'est l'hématite brune qui vient de beaucoup au premier rang. Il y a, de ce chef, une différence fondamentale entre les minerais d'âge secondaire et les minerais paléozoïques dont l'hématite appartient à la variété rouge.

Très importantes au point de vue théorique, les oolithes plus ou moins calcaires sont en moyenne des exceptions. N'empêche, qu'au total, j'en ai rencontré un nombre très élevé. En moyenne, leur degré de fréquence augmente de l'Hettangien à l'Infracrétacé compris.

Incomparablement plus répandues, les oolithes plus ou moins carbonatées et chloriteuses ont une moindre diffusion dans le temps. Elles abondent dans certains minerais lorrains et manquent dans l'Hettangien, ainsi que dans tous les minerais du Lias supérieur, autres que ceux de Lorraine. A partir du Bajocien, on ne peut plus les observer que de loin en loin, ce qui ne les empêche pas de jouer un grand rôle dans quelques dépôts comme ceux du Callovien, et surtout de l'Oxfordien de Normandie.

Les oolithes en fer magnétique sont spéciales au Bassin de Longwy-Briey, où elles présentent un caractère accidentel.

Quant aux formes pyriteuses, ce sont de simples curiosités, pour le moment inconnues en dehors des calcaires à oolithes ferrugineuses de l'Oxfordien de Normandie.

En principe, tous les éléments qui prennent part à la constitution de l'enveloppe corticale se retrouvent dans les nucleus, ce qui ne veut pas dire que les deux parties d'une oolithe aient même composition. De fait, elles sont presque toujours indépendantes dans leur histoire, et c'est pourquoi elles accusent si souvent des compositions très différentes. Lorsque tous les composés ferrugineux entrent en jeu, on observe des oolithes en hématite brune avec noyaux de fer carbonaté, de chlorite ou d'hématite brune, des oolithes en chlorite avec nucleus hématisés ou carbonatés, etc.

L'une des caractéristiques des oolithes étudiées est d'avoir très souvent pour noyaux des fragments d'oolithes remaniées, à différents états de minéralisation. Par exemple, dans les minerais qui font place à la chlorite, un individu pourra être formé d'une enveloppe hématisée et d'un morceau d'oolithe chloriteuse. Inversement un élément se décomposera en une enveloppe chloriteuse et un débris d'oolithe hématisée. Une pareille différence est de la plus grande importance au point de vue de l'histoire des oolithes ferrugineuses et des minerais.

FAUSSES OOLITHES. Des matériaux de nature diverse ont été convertis par les flots en éléments de même forme et de même volume que les vraies oolithes, et toujours confondus avec elles dans les diagnostics à l'œil nu et à la loupe. La grande majorité des pseudoolithes dérivent des Invertébrés et principalement des

Mollusques et Crinoïdes. Leur composition fournit tous les intermédiaires entre les types calcaires et les éléments entièrement minéralisés.

Les fausses oolithes jouent un rôle de premier plan dans l'Hettangien, dont les minerais encrinétiques ont été pris pour des minerais oolithiques, par suite de la forme globuleuse réalisée par les articles triturés. Quoique moins nombreuses, elles sont très répandues dans les stériles calcaires du Bassin de Longwy-Briey, et la proportion en est souvent notable dans les minerais du même Bassin. Exception faite pour celui-ci et le Lias supérieur, les pseudoolithes sont reléguées au rang d'éléments accessoires, sauf dans le Valanginien, où les formes d'origine organique redeviennent très fréquentes. Règle générale, en dehors des minerais de l'Hettangien de Bourgogne, du Lias supérieur de Lorraine et du Valanginien du Doubs, les fausses oolithes consistent en morceaux d'hématite roulés, de même origine que les nucléus des oolithes hématisées auxquelles ils font cortège.

MATÉRIAUX REMANIÉS (voir p. 271).

ORGANISMES. Les organismes vraiment caractéristiques des minerais de fer oolithique, ceux qu'on rencontre toujours ensemble, se répartissent en cinq groupes, auxquels sont dévolus des rôles extrêmement différents. Ce sont : les *Poissons*, les *Mollusques*, les *Crinoïdes*, les *Foraminifères* et les *Algues perforantes*.

D'autres peuvent s'adjoindre à eux et occuper une place appréciable ou notable dans tel ou tel minerai, tout en manquant, soit dans beaucoup, soit dans la presque totalité des autres. Ce sont des *Brachiopodes*, *Bryozoaires*, *Ostracodes*, *Alcyonaires*, *Zoanthaires*, *Holothuries*, *Ophiures*, *Spongiaires* et débris végétaux.

Les fragments de tissu osseux s'observent dans presque tous les minerais, mais ils n'ont jamais d'importance numérique que dans ceux de Lorraine. Les Mollusques et Crinoïdes sont de beaucoup les plus fréquents de tous les restes organiques. Il existe même des minerais dits oolithiques à base de Crinoïdes. Bien que d'une grande diffusion, les Foraminifères sont rares en moyenne. Les traces d'Algues perforantes pullulent, lorsque les débris de Mollusques abondent.

Loin de se borner à participer à la constitution de minerais, la très grande majorité de ces organismes représentent un élément très important, en ce qu'ils subissent des changements de composition, en tous points comparables à ceux des oolithes. C'est

ainsi que les restes de Mollusques et d'Échinodermes, pour ne parler que des plus répandus, peuvent être fossilisés par divers minéraux, tels que calcite, sidérose, hématite, chlorite, magnétite et pyrite. En outre, minéralisés ou non, ils sont pour les oolithes une source inépuisable de nucleus.

CIMENT. Comparé aux minéraux et organismes, le ciment vient presque toujours, et de beaucoup, en seconde ligne, principalement dans les minerais de Lorraine, dont les oolithes se touchent très souvent. Dès le Bajocien son rôle s'amplifie notablement. A l'Oxfordien, il peut l'emporter, pour se restreindre au Barrémien, caractérisé par des oolithes très rapprochées ou contiguës.

Tous les éléments des oolithes se retrouvent dans le ciment, sauf à dire que la calcite l'emporte en moyenne, au lieu d'être reléguée au dernier plan, et que l'argile prend part à sa composition. La matière argileuse fait son apparition dans le Lias supérieur, plus particulièrement dans le Bassin de Nancy où elle semble fréquente. Elle l'est également dans les minerais oxfordiens et barrémiens. A l'opposé de la gangue de nature minérale, qui est celle de la presque totalité des minerais de fer oolithique secondaires, il existe une gangue organique tout à fait exceptionnelle, engendrée par la trituration d'articles de Crinoïdes.

CLASSIFICATION DES MINÉRAIS SECONDAIRES, DITS OOLITHIQUES. Suivant que les oolithes et les organismes prédominent plus ou moins, il en résulte la formation de minerais répondant à trois types distincts :

1. *Minerais oolithiques proprement dits* ;
2. *Minerais encrinitiques* ;
3. *Minerais encrinitiques et oolithiques, ou oolithiques et encrinitiques.*

Les minerais étudiés rentrent, en grande majorité, dans la première catégorie. La seconde réunit les minerais hettangiens de la Côte-d'Or, ainsi qu'une partie des minerais du Lias supérieur de l'Ardèche. Quant à la dernière, beaucoup mieux représentée que la précédente, elle groupe des minerais hettangiens, toarciens, aaléniens et oxfordiens.

LES COMPOSÉS FERRUGINEUX ET LEURS TRANSFORMATIONS. La *sidérose* joue dans la constitution des minerais de fer secondaires un rôle insoupçonné. Tels qu'ils sont aujourd'hui, ces minerais ne lui font réellement une place importante que dans le Lias

supérieur du Bassin de Longwy-Briey, dans l'Oxfordien normand, ainsi que dans une partie du Barrémien. Elle prend part à la formation des oolithes et du ciment et intervient parfois dans la minéralisation des organismes. On peut observer jusqu'à deux et trois générations de ce minéral.

La *chlorite* marche généralement de pair avec la sidérose, car les minerais carbonatés sont en même temps chloriteux, ce qui n'empêche pas la chlorite d'exister parfois en forte proportion indépendamment de la sidérose. De même que le fer carbonaté, le fer silicaté présente son maximum de fréquence dans les minerais lorrains et dans ceux du Barrémien. En dehors de la formation ferrugineuse de Lorraine, où il existe jusqu'à trois générations de chlorite, on n'en compte que deux, la première représentée par les oolithes et la seconde par le ciment. Le plus souvent, le fer silicaté dérive de la sidérose. Il est des cas où il procède de l'argile, et selon toutes probabilités, il peut épigéniser le carbonate de chaux directement.

On sait déjà que l'*hématite brune* est, par excellence, l'élément caractéristique des minerais mésozoïques. Elle existe seule dans beaucoup de minerais du Bassin de Longwy-Briey, mais elle peut être accompagnée d'*hématite rouge*, ou complètement remplacée par elle. Sont caractérisés par l'abondance ou l'existence exclusive de l'hématite rouge, les minerais hettangiens de Bourgogne, les minerais toarciens du Sud du Jura, de la région lyonnaise, de l'Ardèche et de l'Aveyron, les minerais bajociens et bathoniens de Privas et, enfin, les minerais calloviens de La Voulte. L'*oligiste spéculaire* s'associe toujours à l'hématite rouge et l'emporte quelquefois. La formation en deux temps est la règle pour les deux peroxydes. Au premier, appartiennent les éléments autres que le ciment et, au second, les gangues hématisées. L'existence d'une troisième génération paraît accidentelle.

Le *fer magnétique* n'est connu que dans le Bassin de Longwy-Briey.

Quant à la *pyrite*, c'est toujours un minéral de formation tardive, et nullement originel, distribué en inclusions dans la calcite, la sidérose et surtout la chlorite et l'argile. Elle peut figurer dans les oolithes, les organismes et la gangue.

II. Évolution minéralogique des minerais de fer oolithique secondaires.

L'analyse des minerais de fer oolithique paléozoïques m'a conduit à la conclusion que ces minerais ont été successivement

calcaires, carbonatés, silicatés et finalement *hématisés*, l'hématite étant susceptible de procéder directement de la sidérose ou de la chlorite. Dans la très grande majorité des cas, il était impossible de faire la preuve directe d'un point de départ calcaire, en l'absence de tout vestige de carbonate de chaux dans les oolithes. En présence de cette difficulté, j'ai fait intervenir les organismes originellement calcaires. Leur composition étant pareille à celle des oolithes qu'ils accompagnent, on est fondé à conclure que dans tous les cas les oolithes, elles aussi, étaient calcaires dès le principe.

Lorsqu'il s'agit des minerais de fer oolithique secondaires, pas n'est besoin de faire appel aux organismes pour démontrer que les oolithes devaient être calcaires à l'origine, attendu que les individus restés plus ou moins calcaires ne manquent pas. En réalité, les nombreuses oolithes calcaréo-ferrugineuses et ferro-calcaires observées, en nous faisant assister à la minéralisation progressive des oolithes calcaires, sont autant de preuves que les oolithes ferrugineuses auxquelles elles sont mêlées étaient primitivement calcaires.

Par leur proportion très élevée, les organismes calcaires, également observés à différents états de minéralisation, et généralement au même stade d'évolution que les oolithes, fournissent à l'infini des témoignages d'une minéralisation en grand du carbonate de chaux.

Nul doute, dans ces conditions, que les minerais de fer oolithique secondaires de France ne procèdent d'anciens dépôts calcaires.

Ceci posé, trois cas sont à distinguer, qui tous impliquent un état calcaire originel.

1. Les minerais, qui renferment du fer carbonaté, de la chlorite et de l'hématite, ont une évolution minéralogique calquée sur celle des minerais siluriens de Normandie ; c'est-à-dire que la sidérose, qui a remplacé le carbonate de chaux, engendre de la chlorite, puis de l'hématite, cette dernière substance pouvant dériver directement du carbonate de fer. Ledit enchaînement s'observe à la fois dans les oolithes, dans les organismes et dans le ciment. Un grand nombre de minerais secondaires, presque tous liasiques, permettent de le mettre en évidence, sans la moindre ambiguïté.

2. Deux composés ferrugineux sont en présence : la sidérose et l'hématite, ou la chlorite et l'hématite. Sidérose et chlorite donnent naissance à de l'hématite, mais rien ne fait supposer l'in-

tervention de la chlorite dans la première combinaison et de la sidérose dans la seconde. Les deux comportent très peu de représentants.

3. Un seul élément ferrugineux essentiel, l'hématite, entre en jeu, sans qu'on observe jamais la moindre trace de sidérose et de chlorite. En dehors du Bassin de Longwy-Briey, c'est ainsi que les choses se passent pour la très grande majorité des minerais.

Il y a beaucoup trop de minerais relevant de cette dernière catégorie pour que la question d'une histoire simplifiée ne se pose pas. Cette simplification ne mettrait pas en cause la composition première des oolithes, qui auraient été calcaires suivant le cas général. Des exemples de substitution directe de l'hématite au carbonate de chaux sont connus depuis longtemps, et les minerais étudiés en fournissent de très démonstratifs. On y voit, par exemple, de l'hématite rouge ronger peu à peu les éléments calcaires du ciment et finalement les remplacer. Le même phénomène se produit, à grande échelle, aux dépens d'organismes, et toujours en l'absence du plus petit vestige de sidérose et de chlorite. En l'état de nos connaissances, il n'y a pas dans les nombreux matériaux rassemblés d'éléments de démonstration suffisants pour conclure, en toute certitude, que tous les minerais hématisés ont été carbonatés et silicatés à un moment donné de leur existence, et j'admets qu'il en est parmi eux, et peut-être beaucoup, qui sont passés directement du stade calcaire à la phase hématisée.

FORMATION EN DEUX TEMPS DES MINERAIS DE FER OOLITHIQUE SECONDAIRES. Un des faits les plus instructifs mis en évidence, d'un bout à l'autre de la série des minerais étudiés, est que les oolithes ainsi que le ciment n'accomplissent pas leur évolution minéralogique en même temps. A de rares exceptions près, les oolithes sont en avance sur le ciment. La chose, qui est extrêmement claire pour les minerais du Bassin de Longwy-Briey, ne l'est guère moins pour les autres. Les premiers nous montrent, par exemple, des minerais dont les oolithes hématisées sont agglutinées par une gangue de chlorite ou de sidérose. Les seconds, c'est-à-dire les minerais bajociens, calloviens, oxfordiens et valanginiens, fournissent de nombreux types dont les oolithes sont hématisées alors que le ciment est resté calcaire.

On peut dire, en conséquence, que tous les minerais oolithiques d'âge mésozoïque ont été engendrés en deux temps : le premier

correspondant à la formation des oolithes et à la minéralisation des organismes, et, le second, à la genèse du ciment.

Les oolithes dérivant d'oolithes calcaires et le ciment étant lui-même calcaire à l'origine, l'existence de deux temps signifie que les oolithes n'ont pas été minéralisées dans le même milieu que la gangue. En d'autres termes, toutes les oolithes étaient déjà ferrugineuses quand elles ont été mises en place, et seul le ciment a été minéralisé *in situ*. Les arguments ne manquent pas pour imposer cette conclusion sans réserve.

III. Les matériaux remaniés et les enseignements qui en découlent.

Le problème de la genèse des minerais de fer oolithique secondaires est dominé, peut-on dire, par le fait capital que ces minerais renferment des morceaux de minerais remaniés.

Ces matériaux font partie constituante des minerais de fer oolithique de tout âge, y compris les minerais barrémiens. Ce sont des débris généralement oolithiques, appartenant ou non à un seul et même type dans un minerai donné. De forme irrégulière, anguleuse ou plus ou moins arrondie, ils figurent le plus souvent à raison de un ou plusieurs éléments par section mince. Des minerais, exceptionnels il est vrai, en sont essentiellement formés. Ceux qu'on rencontre le plus souvent, c'est-à-dire les débris de nature oolithique, peuvent contenir jusqu'à une dizaine d'oolithes et même davantage. En réalité, dans l'ensemble, leur composition est sujette à de grandes variations. On y peut observer, outre les oolithes, des organismes, des minéraux détritiques, voire même des minéraux secondaires, engendrés avant la mise en place des matériaux, le tout cimenté par de l'oxyde de fer dans la grande généralité des cas. Ce sont des complexes empruntés à un minerai tant soit peu préexistant et entraînés plus ou moins loin de leur point d'origine. De leur étude se dégagent une série d'enseignements, dont je vais énumérer les principaux.

1. Considérés au point de vue de leur provenance, ils se classent en trois catégories :

A. Un certain nombre d'entre eux réalisent le même type de minerai que celui qui les englobe, à cela près qu'ils représentent une manière d'être plus littorale. La caractéristique de tout ce groupe est d'avoir son point de départ dans la direction de la terre ferme.

B. Quelques-uns, de nature oolithique ou non, ont pris naissance tout près du point où ils se trouvent. Ceux qui n'ont pas d'oolithes sont identiques au ciment du minerai dans lequel ils sont inclus. Tout se passe comme s'ils représentaient une portion de la gangue du minerai déjà consolidé.

C. Enfin, ils ont été empruntés à un minerai de constitution telle, qu'au rebours du premier, leur point d'origine doit être cherché dans la direction du large, ainsi que le démontre la considération des minéraux détritiques et des microorganismes.

Le nombre et la répartition des matériaux de cette catégorie font ressortir la fréquence des apports du large aux différentes époques de formation des minerais de fer oolithique secondaires.

2. L'élaboration de ces matériaux remis en mouvement s'est faite du commencement à la fin du dépôt de la couche considérée ; c'est ce que démontre l'existence de fragments dans toute la masse, depuis et y compris la base même jusqu'au sommet.

3. Les morceaux de minerais remaniés ont été invariablement empruntés à l'horizon dans lequel ils sont inclus. C'est pour ainsi dire l'évidence même, *a priori*, lorsque la formation minéralisée étudiée est réduite à une seule couche, ce qui est le cas général. Pour ce qui est des minerais de Lorraine, formant jusqu'à sept couches distinctes sur une même verticale, on peut supposer à première vue que les horizons plus anciens que la couche considérée ont été mis à contribution. S'il en était ainsi, la couche verte échapperait à la règle pour le bassin de Longwy-Briey, dès l'instant qu'elle est la plus ancienne de toutes, et que si elle contient des morceaux de minerais, ils n'ont pu être fournis que par elle-même. Mais le problème de la remise en mouvement des fragments de minerais, inclus dans les sept horizons successifs, rentre dans le cas général, vu qu'il est de règle qu'une couche quelconque soit la source exclusive de tous les débris de minerais remaniés qu'elle contient. La couche grise, par exemple, ne renferme que des morceaux de minerais de la couche grise, et les horizons plus anciens n'y sont pas du tout représentés.

D'où qu'ils viennent, ces morceaux, ils signifient invariablement que *le minerai en voie de formation était remanié quelque part, au fur et à mesure qu'il se déposait.*

4. Ceux qui viennent de la région du large ont toujours été engendrés sans qu'il y ait eu émergence de la couche dont ils procèdent.

Pour qu'une couche de minerai soit remaniée dans ces conditions, il faut que le bassin de sédimentation soit soumis à un mouvement d'élevation continu, de manière que le remaniement ne s'interrompe pas. Cette condition nécessaire n'est pas suffisante, car, à supposer que le remaniement prenne trop d'ampleur, il entraînerait l'érosion non seulement de la couche en voie de formation, mais de son substratum. S'il en était ainsi, les morceaux de minerais seraient accompagnés de roches diverses. Or, il est des gisements, comme ceux du Toarcien du Jura méridional, dont tous les minerais remaniés, sans en excepter un seul, dérivent d'un même type de minerai, complètement dépourvu de quartz détritique et situé du côté de la pleine mer. Comment concevoir que pendant toute la durée du dépôt de la couche les phénomènes de remaniement ne fournissent pas autre chose que des morceaux de minerais? Pour qu'une pareille uniformité soit possible, il faut que le mouvement d'élevation aboutisse à la formation de hauts-fonds, peut-être très rapprochés de la surface et sans cesse attaqués par les courants.

Le phénomène d'érosion sous-marine qui est à l'origine même de l'élaboration des fragments de minerais se répète avec une telle fréquence qu'il s'agit indubitablement d'un phénomène général.

5. L'évolution minéralogique des oolithes et du ciment est un phénomène extrêmement rapide qui marche de pair, pour ainsi dire, avec la sédimentation. Dès que le remaniement intervient, ce qui se produit au début même de la formation d'une couche, l'évolution des éléments du minerai remanié est achevée, y compris celle de la gangue.

ARRÊTS DE DÉVELOPPEMENT LIÉS A DES REMANIEMENTS. CONSÉQUENCES. Un composé ferrugineux, non arrivé au dernier stade de son évolution minéralogique, vient-il à être incorporé à un minerai en voie de formation, il restera à l'état de sidérose, même si le ciment franchit successivement, en sa présence, les phases carbonatée et silicatée pour aboutir finalement à l'hématite.

Cette notion résulte de l'analyse des morceaux de minerais remaniés, principalement des oolithes, et de leur noyau. J'ai déjà dit que les oolithes sont arrivées en place toutes formées. Le temps écoulé entre leur formation, d'une part, leur inclusion dans le minerai et l'élaboration du ciment, d'autre part, peut être très court. Il n'importe. Une fois extraites de leur milieu générateur, elles ne sont plus susceptibles de modifier leur composition. C'est ainsi qu'on peut voir quantité d'oolithes en sidérose dans un

ciment devenu chloriteux, après avoir été lui-même carbonaté, cette transformation de la gangue se faisant en présence desdites oolithes, condamnées à rester indéfiniment carbonatées.

Il en va exactement de même pour les noyaux d'oolithes. Tout noyau est un débris remanié, souvent emprunté à une oolithe préexistante. Par rapport à l'enveloppe, ce noyau est un corps étranger qui a son histoire propre et qui ne participera jamais aux transformations qui s'opèrent autour de lui dans l'enveloppe. Je veux dire qu'il restera carbonaté ou chloriteux, même si l'enveloppe subit une évolution minéralogique complète, qui la fait passer par des états carbonatés et chloriteux avant d'être hématisée.

En conséquence, on ne peut révoquer en doute que *les éléments ferrugineux extraits du milieu où ils ont été formés, et replongés dans un autre milieu qui engendre les mêmes éléments, sont frappés à tout jamais d'arrêt de développement dans leur évolution minéralogique.* Tel est le fait capital illustré par une foule d'exemples. A elle seule, la chimie minérale n'en peut rendre compte.

M'inspirant des admirables travaux de Bernard Renault, j'estime que le phénomène, dont il vient d'être question, s'explique de la même manière que les arrêts de transformation des galets de charbon, remaniés dans le charbon même, c'est-à-dire que l'évolution minéralogique des oolithes et du ciment serait due à un travail bactérien qui, une fois interrompu par un remaniement des matériaux en voie de formation, ne pourrait reprendre, même dans un milieu où d'autres éléments sont en train de franchir tous les stades d'une évolution complète, sous l'influence des mêmes agents biochimiques.

Pour B. Renault, la remise en mouvement des matériaux, sous forme de galets de charbon, met fin pour toujours à l'activité bactérienne, qui engendre les combustibles aux dépens des débris végétaux. Il en serait exactement de même pour les minerais de fer oolithique, avec cette différence que si les houilles sont peuplées de Bactéries, suivant l'expression de B. Renault, la flore bactérienne du minerai de fer oolithique reste à découvrir.

Dès mes débuts dans l'analyse des minerais de fer oolithique il m'a paru qu'à défaut d'intervention bactérienne, leur histoire était condamnée à rester inintelligible. C'est alors que, par raison de nécessité, j'ai vu dans les transformations observées le résultat d'une *évolution* minéralogique, terme évoquant dans mon esprit l'idée d'un phénomène biochimique.

IV. Conditions de milieu.

De l'ensemble des faits observés, il résulte que la sédimentation, qui donne naissance aux minerais de fer oolithique, est celle de bassins en voie d'élévation, profondément troublés par des ruptures d'équilibre, par la formation de rides très instables et soumis à l'influence de courants jouant le rôle d'agents de transport et d'érosion sous-marine. Quel que soit l'étage considéré, il existe des témoignages indiscutables d'une profondeur d'eau extrêmement faible et d'actions mécaniques intenses, qui se révèlent par des ravinements, perforations, durcissements, amincissements et suppressions de bancs, remaniements, préparations mécaniques des éléments, etc.

Tout démontre notamment que les courants ont joué un rôle considérable dans la formation des minerais de fer oolithique de France. A eux seuls, ils expliquent la totalité des particularités mises au compte des failles nourricières, dans l'interprétation du gisement lorrain. Les parties riches résultent tout simplement d'une préparation mécanique, poussée très loin et rassemblant les oolithes, alors que les parties pauvres sont la conséquence d'un défaut de concentration mécanique des matériaux ferrugineux.

L'interprétation que j'ai donnée de la formation des minerais de fer oolithique en deux temps fait de cette préparation mécanique un facteur de première importance. On peut dire que la genèse des minerais de fer oolithique comporte deux milieux, l'un où les matériaux, autres que le ciment, s'élaborent, et l'autre où ils se rassemblent.

Le premier, le *milieu générateur*, est quelque chose d'infiniment complexe. C'est là que les oolithes accomplissent le cycle de leurs transformations et qu'elles sont susceptibles d'être cimentées pour former une roche solide, qui sera démolie sur-le-champ et réduite en morceaux. Après quoi, les oolithes restées libres et les débris de minerais, les unes et les autres amenés à leur état définitif, sont transportés par des courants sur le fond où leur concentration engendre une couche de minerai. Le second milieu, le *centre d'accumulation* où les matériaux se rassemblent, donne naissance à la gangue, c'est-à-dire à une série de composés ferrugineux identiques à ceux des oolithes, et soumis aux mêmes transformations, avec cette différence que, formés tant soit peu plus tard, ils accusent dans l'ensemble une évolution minéralogique moins avancée. De ces deux milieux nous ne connaissons que le second, lequel se confond avec le minerai considéré.

V. Rapidité de l'évolution minéralogique des minerais. Notion d'un métamorphisme sous-marin.

1. Il est hors de conteste que toutes les transformations groupées sous la rubrique « évolution minéralogique des minerais de fer oolithique » ont été extrêmement rapides. Une couche commençait à peine à se déposer qu'elle recevait déjà des fragments ayant accompli toute leur évolution minéralogique, et parfois des complexes témoignant de deux évolutions minéralogiques, successives et complètes, et de deux consolidations également successives. Dès la base des minerais carbonatés, chloriteux et hématisés, il se trouve des oolithes dont les noyaux sont empruntés à des oolithes préexistantes, arrivées au stade hématisé, quand elles ont été brisées, puis remaniées.

De nombreuses observations, réunies dans le même ordre d'idées, m'ont permis d'écrire : *Lorsqu'une couche de minerai de fer oolithique achève de se déposer, son histoire est pour ainsi dire terminée*, abstraction faite, bien entendu, des transformations qu'elle peut subir plus tard sous l'influence des agents météoriques, si elle est ramenée à la surface. L'évolution des composés ferrugineux, la quartzification en grand de la sidérose, la formation des innombrables rognons calcaires des minerais de Lorraine, la consolidation des dépôts, etc., tout cela est l'œuvre de phénomènes qui se passent au fur et à mesure que les matériaux des minerais s'accumulent.

A l'appui de cette conclusion, je pourrais invoquer un grand nombre de faits. Je me borne à rappeler ici que les grains de sidérose clastiques de certains minerais de Lorraine étaient déjà convertis en grains de quartz, lors de la remise en mouvement des fragments empruntés à ces minerais, au cours de la sédimentation. Il est non moins certain que les nodules calcaires de ces mêmes minerais ont pris naissance dans la couche en voie de formation, car il existe des nodules tronqués par une érosion sous-marine contemporaine du dépôt.

2. Les matériaux remaniés — ils sont légion — nous enseignent encore que la consolidation du minerai date pour ainsi dire de son dépôt. C'est ce que prouvent notamment les complexes remis en mouvement au début même de la formation d'une couche. Le remaniement nous met en présence de débris de minerais amenés à leur état définitif, pourvus d'une gangue assez solide pour que les oolithes et organismes situés en bordure soient sectionnés, par usure ou par choc, sans que les agents mécaniques entraînent leur dissociation. Et cela est vrai pour tous les minerais analysés.

De même que l'évolution minéralogique des composés ferrugineux, la consolidation du minerai est donc un phénomène très rapide. C'est également un phénomène sous-marin. Bref, *toute l'histoire des minerais étudiés, consolidation comprise, s'est déroulée sous la mer*. Nous sommes là en présence d'une importante série de métamorphoses, de néoformations et de changements physiques qui datent de la sédimentation même, et que j'ai inscrits au compte d'un *métamorphisme sous-marin*. Ce métamorphisme a laissé des traces ailleurs que dans le domaine des minerais de fer, et il faut s'attendre à ce qu'il revête une certaine généralité avec le temps.

A l'heure actuelle, les conditions de milieu nécessaires à la formation des oolithes ferrugineuses ne sont nulle part réalisées. Cela tient à l'absence des grandes ruptures d'équilibre qui ont joué un rôle capital dans la genèse des minerais de fer oolithique. Ce n'est peut-être pas une raison pour qu'il n'y ait aujourd'hui aucune manifestation de métamorphisme sous-marin. A la lumière de ce que les minerais de fer nous apprennent, on peut se demander si les quelques fonds durs — *hard grounds* —, signalés par le Challenger, résultent bien, comme on l'a supposé, d'un durcissement accidentel et actuel du fond, sous l'influence de courants. Il me paraît au moins aussi rationnel d'admettre que les courants en question exercent sur le fond, en ces points singuliers, une action simplement érosive, entraînant les sédiments en voie d'accumulation, et faisant ainsi apparaître localement des dépôts récemment consolidés ou en voie de consolidation, ces dépôts étant partout ailleurs masqués par des vases et boues. S'il en est ainsi, la consolidation sous-marine des sédiments se poursuit de nos jours, en tant que phénomène général, susceptible d'être observé aux seuls points où le fond est décapé par les courants.

Quoi qu'on puisse penser de cette interprétation des *hard grounds*, il n'est pas douteux que la connaissance du milieu marin ancien ne soit, à notre point de vue, beaucoup plus avancée que celle du milieu marin actuel. Il faut même s'attendre à ce que cette différence s'accroisse encore au profit de la paléocéanographie. Depuis l'admirable campagne du Challenger, l'océanographie des mers actuelles n'a pas fourni la moindre idée directrice à la géologie. L'effort à faire dans ce sens est tellement considérable qu'il est à présumer qu'il ne sera pas fait de longtemps. Et quand il le sera, c'est à coup sûr la paléocéanographie qui fournira à l'exploration des mers les éléments d'un programme de recherches.