

ORIGINE ET MODE DE FORMATION  
DE  
MINÉRAI DE FER OOLITHIQUE  
DE LORRAINE

Par M. Stanislas MEUNIER

INGÉNIEUR AU MUSÉE, SECRÉTAIRE CORRESPONDANT DE LA SOCIÉTÉ

---

Depuis de longues années mon attention s'est portée sur l'étude des gisements de limonite oolithique, dont l'exemple le plus classique se présente dans le département de Meurthe-et-Moselle, et cette préoccupation m'a conduit à concevoir une opinion précise quant à l'origine et au mode de formation de cette intéressante substance.

J'ai opéré successivement par l'observation et par l'expérience synthétique et les résultats auxquels je suis parvenu peu à peu me paraissent d'autant plus acceptables que d'autres auteurs les ont, après moi, formulés plus ou moins complètement, de leur côté, pour des localités et pour des gisements divers.

### 1 — Le Gisement

C'est en 1834 que l'exploitation du minéral de fer oolithique a commencé en Meurthe-et-Moselle. Le premier haut fourneau a été construit en 1837 auprès de Charvigny. Toutefois, il paraît résulter de divers documents que, dès une bien plus grande antiquité, remontant peut-être au cinquième siècle de notre ère, les minerais lorrains étaient déjà traités dans des forges à bras.

On a recueilli de tous les côtés des vestiges de laitiers et de scories d'affinage parfois accumulés en volumineux « ferriers ». Le déblaiement de ces résidus a fourni des armes antiques, des débris d'outils, des tuiles, des vases très caractéristiques et même quelques statuettes en bronze et des monnaies. On a plus d'une fois traité ces ferriers au haut fourneau, comme de simples minerais encore rémunérateurs.

Progressivement, la production métallurgique a augmenté très rapidement et, maintenant, le minerai de fer oolithique joue dans l'économie générale du département de Meurthe-et-Moselle un rôle tout à fait remarquable. Il jalonne d'une manière presque exacte, par exemple auprès de Nancy, le contact mutuel du bas marneux au profil très doux et des falaises abruptes superposées de calcaire bajocien. On peut donc, même de loin, avoir une première idée de la continuité et de l'importance des gîtes : il est vrai qu'ils varient de richesse suivant les points, à peu près comme varient les sources placées à l'affleurement du contact mutuel d'un terrain perméable et d'un substratum étanche.

La formation ferrugineuse, dont les affleurements forment une demi-cinture dans le nord et dans l'est de l'arrondissement de Briey, plonge vers l'orient avec un pendage général du nord-sud-ouest et s'enfonce en augmentant de puissance à des profondeurs croissantes sous le bajocien et le hathonien. Les épaisseurs des terrains superposés approchent de 300 mètres vers l'ouest où la formation pénètre dans le département de la Meuse.

De proche en proche, les sondages ont démontré son existence sur 40 kilomètres du nord au sud et sur 24 kilomètres de l'est à l'ouest, soit sur une superficie de 54.000 kilomètres carrés. M. Rolland, en 1898, en a tracé approximativement la limite occidentale. « Elle figure, dit-il, trois grands promontoires allongés vers l'ouest et le sud-ouest. Au nord, c'est l'ancien bassin de Longwy où existe un premier groupe de concessions, dont une grande partie des minerais a déjà été extraite et qui, en y adjoignant quelques concessions récentes au sud-est, représente 10.622 hectares. Au centre et au sud, c'est le nouveau bassin de Briey, où l'on peut distinguer deux régions : la région méridionale de Briey, Conflans, Batilly, est dite parfois bassin de l'Orne ; elle possède un second groupe de concessions accordées à la suite des sondages de 1882 et 1886 et comprenant 16.147 hec-

tares; on y retrouve déjà deux sièges d'extraction par puits à Jœuf et près d'Homécourt et trois autres en préparation à Auboué, Homécourt et Montiers. La région centrale, enfin, d'Avril à Audun-le-Roman et à Baroncourt, que M. Rolland appelle *le bassin d'entre Moselle et Meuse*, découverte depuis 1892, ne présente pas moins de 22.000 hectares exploitables<sup>(1)</sup>. »

Cette formation affleure suivant une large zone qui s'étend d'abord de l'ouest à l'est, au travers de toute la région de Longwy, ainsi que sur la bordure limitrophe de la Belgique et dans le Luxembourg, puis qui, tournant à angle droit et se dirigeant du nord au sud, règne en Lorraine annexée, le long de la frontière jusqu'au delà de Metz et se retrouve plus loin dans la région de Nancy.

Le dépôt varie comme puissance et aussi comme nombre de couches. Sa plus grande puissance est entre Hussigny, Villerspt, Ottange et Esche. A la Côte Rouge, il atteint 27 mètres et l'on peut y voir cinq couches toutes exploitées, représentant ensemble 16 mètres de minéral. On peut, dans certaines directions, les suivre fort loin et on constate alors très fréquemment des amincissements progressifs et souvent très rapides : il en résulte la notion certaine de la forme lenticulaire des couches. La même disposition se retrouve dans les couches associées, même les plus stériles.

Les couches minces sont seules bien homogènes : dès que l'épaisseur est notable, on y voit une association de bancs différenciant les uns des autres.

L'argile et la marne y forment des veines et des veinules discontinues parallèles à la stratification; ou encore des mouches et des nodules plus ou moins larges et dont l'écartement varie suivant les cas.

Le plus généralement chaque couche de minéral est de structure complexe, comprenant des bancs qui varient par l'épaisseur, par l'étendue horizontale et par la couleur (c'est-à-dire par la composition). Il y a, de toutes parts, des ramifications capricieuses de veinules d'argile, des accumulations en forme de rognons de marnes ou de calcaires, des concrétions variées et en

(1) Georges Roussin, *Sur les gisements de minéral de fer cochléique du nouveau bassin de Briey (Meurthe-et-Moselle)* [Comptes rendus de l'Académie des Sciences, CXXV, 265, 1898].

particulier des boules creuses formées de limonite et renfermant du sable plus ou moins meuble (1).

Fréquemment, on y trouve des fossiles et spécialement des coquilles ou d'autres débris animaux parfaitement déterminables (au point qu'ils permettent de déterminer les horizons stratigraphiques) malgré leur profonde modification chimique : ils consistent souvent en limonite plus ou moins pure et exploitable (2). Il en est de même pour des fragments de bois où le microscope retrouve des délinéaments de structure histologique et qui nous présentent un exemple classique de ferruginification.

Il est impossible de se faire une idée complète des gisements de fer oolithique de Lorraine sans mentionner les *mines de fer fort* qu'on trouve très communément en leur voisinage. On désigne ainsi des poches de forme extrêmement variée, ouvertes dans des masses calcaires par le moyen d'une érosion tout à fait incontestable et qui sont remplies de limonite plus ou moins concrétionnée et tuberculeuse, dérivant sans aucun doute d'un remaniement souterrain du fer oolithique ou des roches qui lui sont associées : Saint-Pancré et Ametz peuvent être cités comme des points classiques pour le *fer fort*.

En de très nombreuses localités, comme Clavigny, Malzéville, Lay-Saint-Christophe, Arnaville, etc., on rencontre, dans les fissures du bajocien, des minerais de fer en grains de grosseurs différentes, disséminés dans des argiles ferrugineuses et sableuses. Tous ces points ont eu une période d'exploitation, et des hauts fourneaux s'élevaient dans leur voisinage ; actuellement ils sont abandonnés.

On peut signaler encore les environs de Pont-à-Mousson comme présentant, dans la masse même du calcaire bajocien, un niveau bien caractérisé d'oolithes ferrugineuses. La couche, qui a parfois 30 centimètres, repose sur des marnes très pauvres en fer et elle paraît avoir été exploitée anciennement en divers points, comme le bois de Grenet, entre Martincourt et Rogéville.

L'arrondissement de Nancy est beaucoup moins riche en gisements de fer en grains que celui de Briey. On n'y voit plus

(1) Pour l'origine de ces nodules creux dont le type est l'*Éclia* ou *Pierre d'aigle* des anciens naturalistes, voir : STANISLAS MARIANI, *Le Naturaliste*, XIV, 231, 1960.

(2) Les carriers désignent ces bancs sous le nom de « coquillages » et ils y trouvent des repères stratigraphiques.

guère d'exploitation : Saint-Pancré est la localité où le travail a persisté le plus longtemps ; elle avait été florissante dans un très grand nombre de points.

Le gisement est caractérisé, avant tout, par l'abondance d'une terre argileuse rouge qui se présente avec évidence comme un produit de rubéfaction et de décalcification dérivant des calcaires bajociens sous-jacents : en effet, la surface de ces calcaires est profondément érodée et souvent la roche est traversée de couloirs plus ou moins rectilignes, à parois verticales, et orientés d'une façon grossièrement régulière. Ainsi, aux environs mêmes de Saint-Pancré, les directions de beaucoup les plus fréquentes sont l'une N-2° 1/20 et R-21° N ; elles se recoupent en beaucoup de points et sont parallèles aux joints qui traversent les roches du pays.

L'argile, plus ou moins sableuse suivant les points, se divise au moindre choc en blocs pseudo-réguliers à surfaces lisses très fréquemment enduites de manganite parfois dendritiforme. La cassure est conchoïde et la ressemblance est intime avec les argiles de décalcification si fréquentes dans les portions étroites et profondes des puits naturels traversant le calcaire grossier de Paris, ou-dessous du diluvium rouge (Ivry, Arcueil, Auvers, etc.)<sup>(1)</sup>.

C'est dans ces argiles que le minéral de fer est disséminé, soit en pisolithes, soit en rognons de volume et de forme très variables et généralement caverneux. La poussière en est tantôt jaune, tantôt rouge-brun, d'après l'état d'hydratation du fer et quelquefois aussi d'après la proportion de manganèse. La gangue est constamment quartzreuse : le quartz tapisse des géodes en plein minéral ; il constitue aussi des blocs de taille parfois notable et dont on a fait du macadam.

## II — La Composition chimique des Minerais

La substance essentielle du minéral est de la limonite globuliforme en ovoïdes, ne mesurant pas plus de 1/2 à 1/4 de millimètre de diamètre et qui sont reliés les uns avec les autres par une argile sableuse, parfois calcaire, parfois siliceuse et toujours ocreuse, disposée en couches régulières.

(1) Stanislas Meunier, *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, 29 mars 1875.



Cette argile, qui recouvre en beaucoup de points le niveau quolithique, est très fréquemment passée elle-même à l'état de minéral, par le mélange de nodules de grosseur très variée, de plaquettes ou de concrétions de limonite. C'est cette nouvelle variété, très différente de la précédente, qui est connue dans la région sous le nom de *fer fort*, ainsi que nous l'avons déjà dit.

D'après de nombreuses analyses, sa composition est celle du peroxyde de fer hydraté (ou limonite) avec mélange de nombreuses substances, parmi lesquelles dominent la silice, l'alumine et plusieurs autres.

On peut, comme moyenne, choisir les chiffres donnés par Braconnier (\*) pour le minéral de fer de Laxou :

|                              |      |
|------------------------------|------|
| Silice. . . . .              | 8,7  |
| Alumine . . . . .            | 2,8  |
| Peroxyde de fer . . . . .    | 75,2 |
| Chaux . . . . .              | 0,3  |
| Acide phosphorique . . . . . | 1,6  |
| Perte au feu (eau) . . . . . | 13,3 |
| Total. . . . .               | 99,9 |

On y trouve une petite quantité de matière organique.

Les variantes à cette composition sont extrêmement nombreuses et elles sont surtout intéressantes par leur rattachement évident à des causes d'altération venant de la surface. C'est ainsi que les échantillons extraits d'une grande profondeur sont plus généralement carbonatés et renferment du fer sulfureux (pyrite ou marcasite suivant les cas).

D'un autre côté, les matériaux associés au minéral et qu'on peut comparer à des gangues, sont en proportions fort inégales d'après des circonstances qu'on ne découvre pas tout de suite. C'est ainsi que, d'une manière générale, les échantillons pris à l'ouest du bassin de Briey sont riches en silice, tandis que ceux qui proviennent de l'est du même bassin sont plutôt calcaires.

La quantité d'alumine non saturée par la silice et à l'état d'hydrate assez comparable à la bauxite, est très inégale d'une région à l'autre. Parfois on a été conduit à la supposer à l'état d'aluminate de fer et même de silico-aluminate (chamosite ou

(\*) Description des terrains qui constituent le sol du département de Meurthe-et-Moselle, 1 vol. in-8, Nancy, 1879, p. 174.

chlorite) comme dans le minerai d'Hayange, aux environs de Metz.

En étudiant avec un soin suffisant de nombreuses variétés de minerai, on arrive à reconnaître que cette complexité de composition tient avant tout à la complication de l'histoire de la substance étudiée, laquelle a traversé des phases extrêmement différentes les unes des autres et que nous essaierons de reconstituer un peu plus loin.

Bornons-nous pour le moment à dire que, dans la région de Meurthe-et-Moselle, la distinction s'impose presque d'elle-même entre trois niveaux superposés : sous une zone marneuse et micacée qui sert de substratum aux calcaires bajociens, on observe un étage dit *couche rouge*; plus bas, se présente la *couche grise* et enfin la *couche noire*. Ces nuances sont loin d'être fixes, parce qu'il y a eu à maintes reprises des suintements dont l'effet a été d'altérer progressivement la composition des minéraux primitifs. Ainsi on connaît, en certains points de la partie la plus inférieure, une couche verte dont la composition, qui rappelle celle de la chamosite de Cordier, est essentiellement différente de celle des couches superposées et qui pourrait, à la faveur d'altérations convenables, retourner à l'état de limonite.

On n'est donc pas étonné de constater que la couleur des grains de minerai est très variable dans les diverses régions du gisement : le jaune mat, le jaune-brun brillant, le jaune-rougeâtre sont les couleurs les plus ordinaires; ces grains peuvent aussi être rouges, rouge-brûlé, verdâtres et bleuâtres.

A mesure qu'on s'éloigne de la surface du sol, la couleur des grains se fonce : elle passe au brun, au violacé, puis au vert ou au bleuâtre. En même temps la proportion du sesquioxyde de fer diminue et celle du protoxyde augmente.

On remarquera que le phosphore figure d'une manière très fréquente dans la composition du minerai qui nous occupe. Les couches de minerai oolithique du toarcien de Lorraine (et il en est de même pour la suite de la formation dans le grand-duché de Luxembourg) renferment 0,006 d'acide phosphorique, c'est-à-dire 0,003 de phosphore. Il en est exactement de même pour le minerai de Cleveland du même niveau en Angleterre. Et c'est peut-être le cas de remarquer qu'à bien d'autres horizons géologiques les minerais de fer se signalent par leur richesse en

phosphore. On a calculé que, de ce chef, et en ne considérant que la France, la Belgique et l'Angleterre, il passe annuellement 30.000 tonnes de phosphore par les hauts fourneaux : il ne faut pas beaucoup d'années pour que cette quantité représente la somme de phosphore contenue dans la population humaine tout entière.

Enfin, il est intéressant, à propos du fer sulfuré mentionné tout à l'heure, de constater que la pyrite existe en particules indiscernables surtout dans les minerais bruns, verts et bleus. Elle y forme souvent des veinules visibles et peut même se présenter en cristaux nets atteignant un centimètre de côté.

Dans les parties voisines de la surface, cette pyrite s'est oxydée et a donné du gypse aux dépens de calcaire voisin : on ne trouve plus dans le minerai que de faibles traces de soufre.

Assez souvent, l'oxyde de manganèse se signale par la nuance noirâtre de taches dans les joints naturels de division.

Comme autres substances, il faut mentionner la magnétite et des corps métalliques comme la blende (\*) et la galène avec leur gangue si fréquente de barytine, les unes et les autres le plus souvent en particules indiscernables et pouvant se présenter exceptionnellement sous la forme cristalline. L'analyse révèle partout de l'arsenic et du titane.

Ajoutons que la gangue du minerai est variable, siliceuse, argileuse ou calcaire. Les minerais siliceux sont souvent friables parce qu'ils sont sableux : le quartz en constitue la gangue sous la forme de grains arrondis, translucides, atteignant parfois la grosseur d'un grain de millet. La gangue argileuse est toujours très ferrugineuse.

D'après Braconnier (p. 174), elle donne à l'analyse :

|                              |      |
|------------------------------|------|
| Silice . . . . .             | 15,7 |
| Alumine . . . . .            | 9,6  |
| Peroxyde de fer . . . . .    | 54,3 |
| Chaux . . . . .              | 7,2  |
| Magnésie . . . . .           | 0,6  |
| Acide phosphorique . . . . . | 0,4  |
| Perte au feu . . . . .       | 12,1 |
| Total . . . . .              | 99,9 |

Mais ces chiffres varient beaucoup d'une variété à une autre.

(\*) On peut ajouter que de notables quantités de zinc métallique ont été, à diverses reprises, découvertes dans les marguerites des hauts fourneaux destinés ou soumis à des réparations.



## III — Structure caractéristique du Minéral

Un des traits les plus remarquables du minéral qui nous occupe concerne sa structure qui est essentiellement *oolithique*. A cet égard, il est de première nécessité de bien préciser la définition de cet état morphologique, car on s'est fréquemment servi de la même expression pour qualifier des choses absolument différentes.

Certains auteurs ont, en effet, appelé *oolithiques* des roches constituées par l'agglutination de petits grains pierreux ayant environ la grosseur des « œufs de poisson » et pouvant avoir les origines les plus diverses. C'est ainsi que, il n'y a pas beaucoup d'années, un géologue affirmait avoir reconnu autour de Paris une demi-douzaine de niveaux oolithiques : parce qu'il confondait sous ce même nom des roches globulifères de catégories fort diverses et même, dans le nombre, des produits d'agglutination de petites algues calcaires sphéroïdales.

Ce qui constitue la structure oolithique, c'est d'être à la fois *concentrique* et *rayonnante*. Elle est portée à son maximum dans maint calcaire et peut se retrouver dans beaucoup d'autres roches : pour la bien voir, il faut tailler des lames minces passant par le centre des oolithes et les observer au microscope.

On reconnaît alors que les couches concentriques, formées d'éléments cristallins convergeant vers le centre, sont ordonnées autour d'un point central que Bleicher a étudié (1). Ce grain consiste souvent, et spécialement dans les échantillons provenant de Ludres, de Malzéville et de Chaligny, en un débris lui-même pénétré de limonite provenant d'une coquille de mollusque, d'un squelette de bryozoaire ou d'un test de foraminifère. Il arrive que la détermination n'en puisse être précisée.

Il est commode, pour pénétrer plus avant dans l'examen de la structure des oolithes, de les faire macérer dans des acides étendus d'eau, ou dans des acides concentrés, voire dans les mélanges d'acides les plus actifs, comme est l'eau régale (mélange d'acides chlorhydrique et azotique), à des températures diverses. On est intéressé en constatant, à la suite de Bleicher, qu'en opérant ainsi

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXIV, 592, 1892.

on peut décolorer complètement l'oolithe, tout en lui laissant sa forme et sa structure (1). Ce produit est presque incolore et on peut le tailler en lames minces.

4. L'ensemble a une apparence comparable à celle des grains d'amidon; la matière n'est pas cristalline, mais elle renferme de petits corpuscules, qui sont peut-être de nature siliceuse.

Tous ces détails de structure se retrouvent sans variante, mais avec des dimensions plus favorables à l'étude, dans les pisolithes du fer fort et de tous les dépôts dits *sidérolithiques*. Nous en avons étudié beaucoup au Muséum, provenant des départements du Cher et du Jura ainsi que de divers pays étrangers. Il en résulte que le volume des oolithes peut passer à celui des vraies pisolithes, sans qu'il s'ensuive la moindre modification de structure, pas plus d'ailleurs que de composition.

Il importe enfin d'ajouter que les oolithes de limonite ne se trouvent pas seulement, dans la formation qui nous occupe, en amas associés seulement à des argiles ou à des sables, mais qu'on en rencontre encore qui sont disséminées, avec une abondance variable, en pleine masse de beaucoup de roches calcaires. Ces calcaires peuvent être blanchâtres ou jaunâtres et on y voit çà et là de petits globules ocreux qui sont tout à fait identiques à ceux dont l'accumulation constitue les couches des minerais.

Ajoutons que dans les oolithes, les matières associées à la limonite sont pour l'ordinaire ocreuses comme les argiles ou les masses sableuses. On peut y trouver des fossiles, parfois même extrêmement abondants, et qui sont formés de limonite dans toute leur masse. C'est le cas très souvent observé pour des ammonites (*Am. Aalensis*, Ziet.), pour *Belemnites tripartitus*, Schlot., *Gryphea ferruginea*; Terq., *Ostrea balceola*; Ziet., *Trigonia navis*; Lam., *Cardium subtruncatum* d'Orb., etc.

Ce sont des détails dont il faudra tenir le plus grand compte au point de vue de la théorie.

(1) Une belle pisolithe de 5 millimètres de diamètre, provenant de Conchécina, et dont la forme sphéroïdale primitive et la structure concentrique étaient parfaitement conservées) m'a donné de cette manière une substance renfermant :

|                              |       |
|------------------------------|-------|
| Silice . . . . .             | 32,50 |
| Alumine . . . . .            | 7,87  |
| Sesquioxyde de fer . . . . . | 2,68  |
| Eau . . . . .                | 4,25  |
| Total . . . . .              | 97,25 |

## IV — Origine et mode de formation du Minéral

Il nous reste maintenant à combiner les résultats procurés par nos études précédentes quant au gisement, quant à la composition et quant à la structure du minéral nolithique, en vue de déterminer l'origine et le mode de formation qu'il convient de lui attribuer.

C'est un sujet qui a déjà été traité par un grand nombre d'auteurs et nous devons tout d'abord résumer très rapidement quelques-unes de leurs conclusions.

On a souvent, et tout naturellement, appliqué à ce problème le point de vue ordinaire de l'ancienne géologie, qui consiste à rattacher tous les caractères d'une formation aux conditions régissant au moment même de son dépôt.

Braconnier<sup>(1)</sup> prétend tirer une notion d'origine de la forme même des couches. Suivant lui, leur disposition lenticulaire « s'explique très bien lorsque l'on reconnaît que le dépôt de minéral s'est effectué sous la mer sur les bords d'un grand golfe situé à l'est du grand bassin jurassique parisien. La forme lenticulaire, signalée ci-dessus, est analogue, ajoute-t-il, à celle des bancs de sable et de vase plus ou moins calcaires qui s'accumulent au fond de tous les golfes. On comprend aussi pourquoi la formation ferrugineuse, dans son ensemble, diminue généralement de puissance de la circonférence vers l'intérieur. La nature des fossiles marins qu'on rencontre en abondance dans les minerais, la présence de nombreux fragments de bois, la structure oolithique, l'obliquité des veines de calcaire formé le plus souvent de coquilles brisées et agglutinées, la disposition oblique des lits de calcaire ferrugineux sont autant de preuves à l'appui d'un dépôt littoral. L'oxyde était progressivement rejeté sur le rivage ». D'après la structure du minéral et la présence, dans sa masse, de bois ayant évidemment flotté et de test<sup>2</sup> animaux ayant certainement vécu dans des eaux peu profondes, on peut affirmer que les calcaires ayant été épigénisés en limonite, étaient, en effet, de formation littorale.

Cette circonstance n'a d'ailleurs qu'un intérêt extrêmement

(1) *Terrains du département de Meurthe-et-Moselle*, p. 203.

secondaire, puisque la transformation s'est faite infiniment longtemps après le dépôt et infiniment loin des conditions originelles.<sup>(1)</sup> Il a fallu que la couche considérée ait été recouverte de dépôts plus récents et sans doute très épais qui l'ont éloignée de la surface du sol et amenée jusqu'à des régions où le degré géothermique était alors compatible avec les modifications constatées. Plus tard un soulèvement a ramené les masses vers la surface et l'érosion a supprimé une partie du recouvrementoolithique; parfois même des assises superposées à celui-ci et par conséquent plus récentes. Il est possible que, dans leur prolongement suffisamment profond, les couches toarcienncs continuent à subir la réaction des circulations ferrugineuses.

Bien plus récemment, M. P. Villain<sup>(2)</sup> adoptant à son tour la condition littorale dominant pendant la constitution du gîte, rattache celui-ci au jaillissement de sources ferrugineuses au fond de la mer toarcienne. Selon lui, ces sources ferrugineuses sont venues de la profondeur par des fissures de l'écorce terrestre coïncidant avec des failles dont la plupart sont bien reconnues aujourd'hui. Tous les auteurs cependant semblent admettre que ces failles sont postérieures au dépôt du minerai. Mais M. Villain trouve qu'il est bien plus naturel de « supposer que les mouvements du sol postérieurs au dépôt du mineraioolithique et qui ont contribué à donner à la surface son relief actuel, se sont effectués suivant des cassures préexistantes, qui déterminaient des lignes de moindre résistance dans l'écorce terrestre ».

« Le système des cassures dans le bassin de Briey, ajoute l'auteur, semble avoir pris son équilibre à l'époque tertiaire. C'est à ce moment qu'une série d'émergences thermales a pu engendrer, par un retour d'activité de l'énergie interne, les minéraux dits *fer fort* toujours superposés au feroolithique. L'activité des sources thermales ayant été fort variable d'un point à un autre, on s'explique aisément que les différentes couches du gisement présentent une valeur très inégale dans les différentes localités du bassin. En Lorraine, le centre principal des émissions ferrifères est situé (aussi bien pour les minerais liasiques que pour les minerais tertiaires) entre Audun-le-Tiche et Esch-sur-Alzette. Ces émissions s'expliquent par la grande faille d'Audun-le-Tiche qui

(1) P. VILLAIN, *Sur la genèse des minerais de fer dans la région lorraine* (Comptes rendus de l'Académie des Sciences, CXXVIII, 1891, 1892).

occasionne un rejet de plus de 100 mètres dans la région. Du centre d'émission principal qui devait se trouver non loin de Bonvillers, l'élément ferrugineux, qui se précipitait sans cesse dans le sein des eaux sous forme d'oxyde pulvérulent, grâce à l'apport continu des sources, s'est dispersé inégalement dans les différentes directions suivant les pentes favorables du fond de la mer. Il convient de remarquer que la théorie des *failles nourricières* donne parfaitement l'explication des faits qu'on voulait rattacher autrefois à la *théorie des affleurements*. Les bons minerais, disait-on, ne se trouvent qu'aux affleurements. Cela se comprend en observant que les érosions se sont produites principalement suivant le trajet d'anciennes failles. Quand ces failles avaient été nourricières, le cours d'eau emportait dans ses alluvions la partie du gisement comprise dans les terrains détruits qui était généralement la plus riche. Il laissait sur les flancs de la vallée des lambeaux de couches dont la minéralisation et la puissance diminuaient au fur et à mesure qu'on s'écartait de l'axe de la vallée, c'est-à-dire de la faille nourricière. »

De son côté, M. Georges Rolland a publié une théorie dont la partie essentielle peut être résumée en peu de mots : « Les minerais de fer oolithique, dit-il (1), sont considérés comme sédimentaires et comme contemporains des couches qui les renferment; comme des formations littorales dont les divers matériaux étaient apportés par des eaux continentales dans des estuaires maritimes. Leurs oolithes ferrugineuses ont dû être formées (à la manière des oolithes calcaires) par la précipitation du carbonate de fer en dissolution dans les eaux marines; les sels qui leur ont donné naissance provenaient des continents voisins et résultaient, soit de la décomposition des pyrites, soit de la décalcification des calcaires ferrugineux. Si on compare les courbes d'épaisseur et de teneur en fer, on trouve entre elles une concordance grossière permettant de dire que, le plus souvent, l'épaisseur et la teneur varient dans le même sens d'une région à l'autre. Mais parfois on observe l'inverse et il n'y a plus de relation quand on entre dans les détails; en effet, les oolithes ferrugineuses ayant dû être distribuées dans les courants marins, on comprend que de légères variations dans l'intensité de ceux-ci aient amené par places une

(1) Georges Rolland, *À propos des gisements de fer oolithiques de Lorraine et du leur mode de formation* (Comptes rendus de l'Académie des Sciences, CXXVII, 444, 1901).



plus grande quantité de matière stérile ou inversement. Ma conclusion générale c'est que ces minerais sont bien de nature sédimentaire et d'origine continentale. »

Amené par le sujet général qui l'occupe à dire son opinion sur la question, M. A. Lacroix<sup>(2)</sup> déclare de son côté qu'il accepte volontiers « la contemporanéité de la formation des nolithes ferrugineux et des calcaires qui les renferment et l'origine continentale du fer ».

Quant aux détails, Braconnier pense<sup>(3)</sup> que les formes et les aspects divers de la limonite s'expliquent très bien « si l'on admet que cet oxyde a été formé par la peroxydation à l'air et la décomposition du carbonate de fer tenu en dissolution dans l'eau ».

« Lorsque, dit-il, l'oxyde de fer s'est déposé dans des golfes à ouverture étroite et par conséquent d'une eau déjà concentrée par évaporation, il se présente sous la couleur rouge vif. »

Un peu plus loin le même auteur déclare qu'on ne peut trouver l'origine du carbonate de fer ni à la surface des continents ni dans l'eau de la mer : « On est obligé d'admettre que ce carbonate a été amené par des eaux minérales venant d'une grande profondeur. Les eaux chargées d'acide carbonique, lorsqu'elles descendent, par les fissures de l'écorce terrestre, à de grandes profondeurs auxquelles règnent des températures assez élevées et de fortes pressions, sont, en effet, capables de décomposer les roches et de dissoudre une portion de leurs éléments, en ne laissant à leur place qu'un résidu plus ou moins poreux. »

Il faut cependant remarquer que les partisans de la contemporanéité du minerai et des couches qui le contiennent sont un peu embarrassés par la richesse de celles-ci en fossiles. « Le dépôt d'oxyde de fer, dit Braconnier<sup>(1)</sup>, ne paraît pas avoir chassé les animaux marins comme cela a eu lieu lors du dépôt du sel dans les golfes intérieurs. » Mais ils s'en tirent en supposant que « les couches de minerai ont dû se former tout aussi lentement que les autres sédiments ».

Quant à expliquer comment le test des coquilles peut être lui-même constitué entièrement par de la limonite qui, évidemment,

(1) *Minéralogie de la France et de ses colonies*, t. III, p. 383, 1901.

(2) *Loc. cit.*, p. 57.

(3) *Loc. cit.*, p. 303.

s'est substituée à la matière calcaire primitive, ils n'y font pas même allusion.

Quelques-uns cependant se préoccupent d'expliquer l'état oolithique si caractéristique du dépôt.

Pour le calcaire oolithique, Braconnier émet l'avis<sup>(1)</sup> qu'« il paraît extrêmement probable que le calcaire oolithique s'est déposé dans des eaux animées d'un mouvement sensible de va-et-vient, les grains de sable très fins soulevés par ces eaux ont été entourés de couche concentriques du calcaire qui se précipitait de sa dissolution ». Et il est évident qu'il ne ferait pas de difficulté pour étendre à la limonite le mécanisme qu'il admet pour le calcaire.

Allant plus loin, M. Thoulet a étudié<sup>(2)</sup> un fond marin côtier provenant de la Manche (profondeur 25 mètres) à l'est de New-Haven (latitude 50° 43' 30" N, longitude 2° 13' ouest de Paris). On y voit 6 % d'un *sable lourd* composé de nodules de limonite pisolithique dont la majorité est d'un noir brillant, le reste de couleur rouge brique mat et jaune ocreux. « Les nodules de limonite, dit l'auteur, sont identiques comme aspect aux nodules contenus dans les terrains jurassiques de Lorraine. La plupart sont *mamelonnés, noirs et comme vernis*. Traité microchimiquement par les acides azotique et chlorhydrique, ils donnent la réaction du phosphore et laissent un résidu de *silice gélatineuse*. Sa conclusion est « que les nodules de Lorraine pourraient avoir une origine comparable à celle de ces productions actuelles<sup>(3)</sup> ». Toutefois, il semble, d'après cette remarque, que l'auteur ait moins en vue le fer oolithique que le *fer fort* ou sidérolithique et cependant celui-ci ne paraît guère pouvoir être rattaché à un processus marin.

Sans insister davantage sur ce côté, pour ainsi dire historique, de la question, nous allons étudier le problème d'une manière complètement indépendante des solutions qui en ont été proposées et, pour parvenir plus sûrement à notre but, nous diviserons la question en plusieurs points:

Pour commencer, considérons le point de vue morphologique

(1) *Loc. cit.*, p. 55.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXLV, 1211, 1907.

(3) Voir le mémoire de M. THOULET, *Études des fonds marins de la baie de Seine* in *Annales hydrographiques*, 1908-1909.

et demandons-nous comment le minéral a acquis la structure oolithique qui le caractérise d'une manière si remarquable.

On sait que, bien que cette structure soit donnée à certaines substances sous nos yeux mêmes par des dispositions géologiques très faciles à analyser, il ne semble cependant pas que ces observations actuelles soient applicables à notre sujet.

Nous faisons allusion à la concrétion du calcaire dans les eaux tumultueusement tourbillonnantes des sources bicarbonatées. A Tivoli, à Saint-Philippe de Toscane, à Hammam-Meskoutine et bien ailleurs, on voit le fond du bassin fontigénique se garnir d'une collection d'oolithes ou de pisolithes consistant dans la concrétion successive de minces feuilletés sphéroïdaux et concentriques de chaux carbonatée, autour d'un petit grain ballotté dans l'eau gazeuse et qui exerce le pouvoir d'un centre d'attraction. Parfois, à la calcite vient s'associer la pyrite de fer et c'est ce qui a lieu dans la source algérienne, mais jamais rien ne se dépose ainsi qui ne soit cristallisable.

Or, l'examen des oolithes, dont les couches calcaires sont formées dans tant de régions et spécialement dans les régions jurassiques, montre du premier coup d'œil que ce procédé, si favorable, par exemple, à l'explication du Rocher des Célestins, à Vichy, ne s'applique, en aucune façon, à l'interprétation des couches marines. Il est fréquent, en effet, de trouver dans celles-ci des oolithes où la section révèle la coexistence de deux ou de plusieurs centres qui, après avoir agi séparément, se sont laissés envelopper de compagnie dans un certain nombre de revêtements communs. Ici, le procédé fontigénique est évidemment rendu tout à fait impossible, le ballottement dans l'eau devant nécessairement séparer les uns des autres les petits centres attractifs.

Du reste, on trouve très rapidement dans les couches jurassiques des fossiles de tous genres dont les cavités souvent étroites ont reçu des oolithes et parfois en grand nombre, là où les tourbillonnements eussent sans doute été impossibles comme vers l'extrémité des tours de spire des étroites Nérinées.

Il faut donc, de toute nécessité, trouver autre chose et l'observation ne tarde pas à procurer les éclaircissements dont elle est si prodigue envers qui la sait convenablement interroger. Elle montre, en effet, que maintes masses rocheuses sont, après leur solidification, le théâtre de mouvements intestins qui séparent les

matières cristallisables de celles qui sont amorphes, pour les concentrer peu à peu autour de certains points, en oolithes véritables. Sans nous attarder à l'accumulation des exemples, citons comme spécialement probante l'acquisition, par certains limons argilo-calcaires très récents, de la structure dont il s'agit. Le loess solidifié des environs de Lyon a procuré à Fournet des résultats de ce genre (1) : dans le lieudit Au-Bois, au Mont-d'Or lyonnais, il a observé des plaques lenticulaires de loess sableux et complètement solidifié, au milieu desquelles sont des oolithes de 1 à 5 millimètres, parfaitement régulières.

En maints endroits, la masse des roches calcaires présente des effets analogues. Vézian (2) a observé aux environs de Barcelone « les fissures par où sont arrivées dans ce pays les eaux pétrogéniques qui ont déterminé la formation du tuf et du travertin : elles sont remplies d'un albâtre calcaire fibreux renfermant des pisolithes de la grosseur d'un pois ou d'une noisette. La structure de ces pisolithes est à la fois concentrique et rayonnée. Dans quelques cas, cette double structure se prolonge autour des pisolithes et s'efface insensiblement dans le calcaire fibreux qui les contient ».

Sans épuiser le sujet, je peux mentionner de vraies pisolithes gypseuses que j'ai rencontrées, il y a peu d'années, dans les marnes tongriennes de Sannois (3) et qui présentent ce caractère remarquable de reproduire par des spécimens naturels, le résultat d'expériences où j'avais assisté précédemment à la cristallisation spontanée du gypse aux dépens du plâtre gâché et solidifié (4).

La conclusion de ces différents faits semble bien évidente : c'est que le calcaire oolithique doit sa structure caractéristique à un travail intestin ou moléculaire, déterminé par l'attraction mutuelle de particules possédant les mêmes caractères cristallographiques et qui se groupent en conséquence autour de certains centres d'attraction. La boue primitivement déposée dans la mer pouvait être très complexe et renfermer, outre le carbonate de chaux, une proportion plus ou moins forte d'argile, de marne, de

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, XXXVII, 528, 1863.

(2) *Prodrome de Géologie*, I, 301. Paris, 1835.

(3) *Variété nouvelle du gypse de Sannois* in *Bulletin du Muséum*, XIV, 70, 1902.

(4) *Sur un cas remarquable de cristallisation spontanée du gypse* [*Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXXXVII, 342, 1903].



sable, etc. : ces corps sont restés relativement inertes pendant le déplacement de la calcite et se sont trouvés refoulés dans les interstices des oolithes à l'état de matière conjonctive ou ciment : substance parfois si abondante qu'à cause de ses qualités physiques et chimiques, les oolithes y sont disséminées à de grandes distances les unes des autres.

Le phénomène dont il s'agit, c'est-à-dire l'acquisition, par le calcaire, de la structure oolithique, se présente comme caractérisant une étape dans l'évolution normale (c'est-à-dire moyenne) des roches formées de carbonate de chaux prédominant et c'est ce que j'ai eu l'occasion de développer récemment<sup>(1)</sup>. Ce que j'en veux retenir ici c'est que la boue sous-marine ancienne, jurassique, par exemple, présentant au début une structure terreuse sensiblement uniforme, a traversé des conditions fort diverses par le seul fait de son recouvrement progressif par des sédiments de plus en plus récents. Après un temps suffisamment prolongé, elle a pénétré ainsi du domaine superficiel à température dérivée du Soleil et dès lors plus ou moins variable, dans les régions profondes à température d'origine interne et conséquemment constante pour chaque profondeur, l'eau d'imprégnation et de circulation interstitielle des roches y jouissant des propriétés mises en évidence par les expériences de Sénarmont et dont les effets se traduisent, selon les cas, par la réalisation des divers produits métamorphiques. La cristallisation du calcaire s'est développée peu à peu et a provoqué la constitution oolithique qui demande apparemment, pour être bien complète, le laps de temps qui s'est écoulé depuis l'époque jurassique jusqu'à la période actuelle.

C'est ainsi qu'on peut, en bien des cas, déterminer l'âge d'un calcaire par cette seule texture. Il est vrai qu'il arrive de rencontrer, quoique rarement, et en mettant de côté les résultats du processus fontigénique, des roches plus jeunes que le jurassique et qui sont déjà oolithiques : mais cela s'explique toujours par des circonstances spéciales et, par exemple, par l'intervention de quelques corps cristallogéniques comme le sel marin, pour le gypse. Il est vrai aussi qu'inversement bien des roches calcaires jurassiques ne sont pas oolithiques, mais il y a bien des raisons

(1) *La Géologie générale*, 1 vol. in-8 (2<sup>e</sup> édition), p. 117. Paris, 1909.



de croire que, souvent, elles l'ont été et qu'elles ne le sont plus, ayant été soumises à des réactions qui d'habitude sont plus lentes à se faire sentir et qui développent dans le calcaire un stade évolutif plus avancé. A ce titre, rien n'est plus instructif que la comparaison des roches entièrement oolithiques du terrain bathonien de Marquise (Pas-de-Calais) ou de Caen (*oolithe miliare*) ou du Cher, — avec les calcaires marbres du Bugey et des Pré-Alpes, qui sont du même âge et où la structure lamellaire s'explique tout de suite par l'énergique déploiement du métamorphisme orogénique, qui est venu ajouter ses effets à ceux du métamorphisme normal (ou bathydrigue).

Il est, en outre, facile de constater en maintes localités que des bancs, parfaitement oolithiques en certains points, se modifient peu à peu, dans une direction donnée, pour passer à des masses qui, ou bien sont restées terreuses, ou bien sont déjà devenues spathiques et marmoréennes; la composition intervient autant que l'intensité du métamorphisme éprouvé.

Ce point de vue une fois admis, que la structure oolithique est le résultat du travail spontané de masses calcaires primitivement uniformes et terreuses, il y a pour nous le plus vif intérêt à comparer les calcaires oolithiques ainsi produits aux limonites également oolithiques dont il s'agit d'expliquer l'origine et le mode de formation.

A cet égard, il est facile de rapprocher des échantillons qui ne diffèrent vraiment aux yeux que pour la couleur, blanche chez les uns, ocreuse chez les autres. La manière d'être au point de vue physique est entièrement semblable. Des deux parts, se signalent de petits globules plus ou moins abondants au sein d'une masse générale où il est facile de reconnaître, ici de l'argile, plus loin du sable, etc. D'ailleurs, il n'est pas rare, dans le département de Meurthe-et-Moselle, par exemple vers Bonnières-aux-Dames, de passer sans quitter une couche donnée du minerai exploitable à des masses de plus en plus calcaires ou de moins en moins ocracées et, de proche en proche, à des calcaires proprement dits.

Il y a bien longtemps que la vue de semblables passages m'avait, pour ma part, donné l'idée que la couche ferrugineuse pouvait bien être un résultat de la transformation d'une assise primitivement calcaire.

A cet égard, les arguments principaux paraissent devoir être fournis par la méthode expérimentale. L'appareil consiste dans une *éprouvette à dessécher*, dont on obstrue la portion étranglée par un tampon d'amianté et qu'on remplit du produit de désagrégation d'une variété convenablement choisie de calcaire oolithique : des spécimens provenant de Marquise et de Tonnerre ont été souvent employés <sup>(1)</sup>. Une fois la colonne remplie avec les précautions nécessaires, on la recouvre de quelques centimètres de gravier afin de la maintenir bien stable, puis on arrose le tout avec une dissolution plus ou moins étendue (généralement *très étendue*), froide ou chaude suivant les cas, de sulfate de protoxyde de fer.

On constate, au bout d'un temps suffisant, que le liquide sortant par le bas de l'éprouvette ne contient que du sulfate de chaux, tout le fer ayant été arrêté par le calcaire, qui prend tout de suite, à la partie supérieure, la couleur ocreuse caractéristique. Mais, chose très curieuse et imprévue, il suffit de faire durer quelques heures l'expérience en renouvelant la solution ferrugineuse, pour reconnaître que beaucoup de sulfate de fer passe inaltéré et peut se retrouver dans le liquide rejeté. Ce fait aura beaucoup d'applications dans l'explication des faits naturels.

Par exemple, il rend très facilement compte d'une particularité des gisements que nous avons déjà mentionnée et qui a une grande importance : elle concerne l'existence d'oolithes de limonite disséminées dans une roche calcaire, peu ou point ocreuse. En mentionnant dans sa *Minéralogie de la France* <sup>(2)</sup> les expériences qui nous occupent, et que j'avais antérieurement publiées, M. A. Lacroix disait : « Je suis surtout frappé de l'identité de structure que présentent (oolithes mises à part), dans une même localité, les calcaires extrêmement riches en oolithes ferrugineuses et ceux qui en renferment peu et qui passent à des calcaires n'en renfermant pas; cette identité me semble incompatible avec une transformation aussi radicale que celle qui devrait être la conséquence de l'apport postérieur, par un procédé

(1) Voir, par exemple, Stanislas MEUSNIER : *Les Méthodes de synthèse en Minéralogie*, 1 vol. in-8, Paris 1891, p. 324 et suiv., et du même auteur, *Catalogue de la Collection de Géologie expérimentale du Muséum*, 1 vol. in-8, Paris 1907, p. 88.

(2) Tome III, p. 382, Paris, 1901.

quelconque, de la quantité de fer nécessaire à la production des minerais oolithiques. On comprend très bien que des calcaires puissent être épigénisés en bloc en produits ferrugineux, mais l'élection du fer dans une partie seulement des éléments de la roche est plus difficile à concevoir. »

Or, les faits se chargent de répondre eux-mêmes à cette objection : quand on remplit l'éprouvette à dessécher avec le produit de désagrégation du calcaire oolithique de Tonnerre, par exemple, on jette cette poussière par petites portions dans le vase (généralement au moyen d'une spatule ou d'une carte). A chaque fois, pendant la chute, il se fait un triage et les oolithes arrivent en bas avant la matière bien plus fine à laquelle elles étaient mélangées. Il résulte de là que le remplissage est fait de petits lits alternatifs, très vaguement limités, bien entendu, de matériaux relativement grossiers et de portions très fines, dans lesquelles aussi des oolithes sont disséminées. Or, le résultat de l'arrosage avec la solution métallique très étendue, c'est la ferruginification plus ou moins rapide des parties grossières et par conséquent des oolithes, bien avant que la portion fine commence à changer de couleur. Je conserve à mon laboratoire du Muséum et j'ai même exposé dans la galerie publique, aux vitrines de la Géologie expérimentale, plusieurs éprouvettes qui montrent que, malgré la difficulté de la concevoir, l'élection d'une partie seulement de la roche calcaire par la précipitation du fer est un fait réel et incontestable.

D'autres considérations doivent être citées encore comme comprenant le phénomène épigénique que nous admettons. Ainsi, malgré la très intime ressemblance des couches de minerai avec les couches de calcaire d'où elles dérivent, on peut cependant y noter une différence dans la forme des oolithes : parfaitement sphéroïdales dans le calcaire, elles sont plus petites et ellipsoïdes dans la roche ocreuse et leur grand axe est parallèle au plan de sédimentation.

Il est évident que la substitution de la sidérose ou de la limonite, dont la densité est égale à 3,8, à la calcite qui pèse seulement 2,7, ne peut se faire sans déterminer, dans la masse qui en est le siège, une contraction notable et par suite un tassement dont la forme aplatie des oolithes ferrugineuses est comme un reflet. Un poids donné de carbone (6 grammes, par exemple) passe de la

substance de 50 grammes de calcite initiale qui occupait 18<sup>m</sup>5, dans celle de 58 grammes de sidérose qui occupe seulement 15<sup>m</sup>2. Le rapport de ces deux capacités, ou 0,821, représente la contraction de chaque unité de volume de la couche.

Nous disons: la sidérose, au lieu de la limonite, car il est évident que c'est la sidérose qui s'est substituée à la calcite du début. Seulement dans une grande partie du gisement et surtout quand, en conséquence des palpitations de la croûte du globe, les masses sont revenues au voisinage de la surface, le carbonate de fer s'est décomposé et est passé à l'état d'hydrate de peroxyde. La preuve irréfutable, c'est que, dès qu'on attaque les parties profondes du gisement, le fer n'est plus à l'état de limonite, mais à celui de sidérose. On retrouve de la sidérose dans la plupart des échantillons, même dans ceux venant de profondeurs faibles, comme si la décomposition n'était pas encore terminée, et l'on voit que le gisement pris dans son ensemble présente les mêmes variations générales qu'un filon pourvu de son *chapeau*, ou « gîte de couverture ».

Mais le phénomène épigénique, simple détail du métamorphisme bathydrigue, comprend d'autres particularités encore. En résumant les traits de composition des oolites, nous avons mentionné plus haut la présence, découverte dans leur substance, d'une proportion notable d'alumine.

Cette alumine doit être soigneusement distinguée de la même substance faisant partie constitutive de l'argile renfermée dans le calcaire initial et qui persiste dans le minerai de fer. On reconnaît aisément qu'elle est à l'état d'hydrate et qu'elle appartient en conséquence à l'espèce *Diaspore* et au type qualifié de *Bauxite*. L'histoire de la bauxite est très ressemblante à celle de la limonite et on s'explique que ces deux substances s'accompagnent dans un très grand nombre de gisements.

Nous avons, pour notre part, répété avec des dissolutions de sels d'alumine, les expériences de précipitation par le calcaire décrites tout à l'heure pour les solutions ferrugineuses. Elles nous ont fourni des résultats comparables et dont une partie s'applique très directement à l'histoire du fer oolithique. Elles ont en même temps procuré des données des plus nettes quant à l'histoire des gisements de bauxite. Sans y insister, nous constaterons que dans ces derniers temps on a compliqué comme à



plaisir le sujet dont il s'agit, en mélangeant à la bauxite la substance qualifiée de *latérite* et qui, tout en ayant la même composition chimique, dérive d'une origine essentiellement différente où paraissent intervenir des réactions microbiennes. On n'a pas réfléchi que c'est à peu près comme si l'on voulait faire jouer un rôle dans l'histoire géogénique du spath d'Islande, aux réactions qui sont en jeu dans les récifs madréporiques, sous le prétexte que, dans les deux cas, il y a production de chaux carbonatée.

Si l'on arrose du calcaire disposé dans l'éprouvette à dessécher, au moyen d'une dissolution aqueuse et étendue de sulfate d'alumine, on constate qu'il se reproduit du sulfate de chaux et qu'il se dépose de l'alumine gélatineuse pendant que l'anhydride carbonique se dégage. On arrive ainsi à transformer complètement les oolites calcaires en oolites de bauxite<sup>(1)</sup>.

Ce serait nous éloigner de notre but que de trop insister sur ce chapitre. Il nous suffira d'en retenir que l'alumine est précipitée dans les mêmes conditions que l'hydrate de fer et probablement avec le même état intermédiaire, peut-être virtuel, d'un carbonate d'alumine<sup>(2)</sup> correspondant plus ou moins à la sidérose.

Pour donner une idée de cette précipitation, je dirai qu'ayant abandonné un fragment de 15 grammes de marbre de Carrare dans 50 centimètres cubes d'une solution assez concentrée de sulfate d'alumine, j'ai pu, après quelques jours, retourner le vase, sans que la roche, prise au milieu d'une épaisse gelée d'alumine, ait manifesté la moindre propension à tomber. La gelée, très transparente, était remplie de grosses bulles d'acide carbonique.

Il faut, comme pour le fer, des solutions très étendues, pour obtenir de vraies épigénies, c'est-à-dire la conservation de la structure.

La conséquence de ces faits, c'est qu'il paraît légitime de voir dans les bancs de minerai de fer oolithique de Lorraine, des couches de calcaire qui, — après un séjour assez long dans les profondeurs souterraines où les avaient amenées les recouvrements stratigraphiques postérieurs, pour que leur structure soit devenue oolithique, — ont été baignées par des suintements d'eau

(1) Dans certains cas j'ai obtenu des globules de sous-sulfate d'alumine ayant avec la Weltschite oolithique de l'argile plastique de Vauves des analogies remarquables.



renfermant en dissolution des quantités inconnues et peut-être très-faibles de sels de fer, mêlés à des sels d'alumine. Ces sels agissant à une température supérieure à celle de la surface et correspondant à la profondeur du gisement, ont attaqué le calcaire pour en faire des composés solubles qui ont été entraînés par la circulation bathydrigue. Le carbonate de fer et l'alumine précipités se sont constitués à l'état de sidérose et de bauxite.

On voit tout de suite que cette histoire ne sera pas changée si nous supposons que la transformation du calcaire initial a lieu dans des couches n'ayant pas la structure oolithique.

Par exemple, des couches de calcaire compact pourraient donner des lits de limonite également compacts et des calcaires quelconques fourniraient des produits reflétant dans leur constitution la structure qu'ils présenteraient.

Il pourra y avoir eu au début, dans le sein d'une couche plus ou moins perméable d'argile sableuse, par exemple, constitution de concrétions calcaires du genre des *chailles*. La réaction s'appliquant à ces concrétions les transformera en nodules plus ou moins voisins des *Stélites* et de masses analogues.

D'un autre côté, ces produits ont continué souvent à éprouver l'action des agents souterrains sans cesse en fonction, et parmi les conséquences qu'ils en ont éprouvées, il en est d'intéressantes.

En certains pays, les recouvrements stratigraphiques et plus souvent les mouvements orogéniques, — parfois aussi l'injection de roches éruptives, ou la poussée de liquides ou de vapeur d'eau venant des régions profondes — ont déterminé des transformations nouvelles et c'est ainsi, pour le dire en passant, qu'il faut comprendre la genèse des couches de sanguine ou oligiste terreux remplies d'empreintes de fossiles déterminables, comme on en voit à La Voulte (Ardèche) et en bien d'autres lieux. L'histoire de l'oligiste stratiforme silurien de Saint-Remy, près de Flers (Calvados), n'est qu'une exagération des faits précédents.

Mais si le fer de Lorraine n'en est pas là, il manifeste pourtant, dans une foule de ses parties, l'action qu'il a éprouvée de la part des agents qui circulent en profondeur. C'est ainsi que dans un grand nombre de cas il s'est silicifié. La silification peut n'avoir rien à voir comme époque avec les phénomènes précédemment

décrits et elle n'est qu'une des mille formes de la *pétrification* possible de tous les objets enfoncés dans de certaines conditions. C'est une variante de la transformation en silex, en calcédoine et même en quartz des bois des forêts tertiaires du Caire et de l'Arizona : cette transformation s'est également réalisée par l'intervention des eaux chaudes de profondeur, quand les assises contenant les vestiges organiques étaient recouverts d'une masse suffisante de sédiments plus récents. C'est leur retour vers la surface et la décapage par érosion que celle-ci a éprouvé qui les ont mis bien plus tard sous nos yeux dans des situations qui feraient croire, à des observateurs non préparés, qu'il s'agit de la minéralisation d'arbres vivants constituant des forêts sub-aériennes.

La silicification du minerai lorrain est une variante du phénomène qui a donné naissance aux meulieres et à tous les lits silicifiés parfois très fossilifères comme on en voit dans la colline de Saint-Priest, auprès de Saint-Étienne (pour limiter nos exemples au plus célèbre de tous), grâce aux travaux de M. Grand'Eury avec qui j'ai eu le plaisir de les visiter naguère.

Mais, en bien des points, les transformations ne se sont pas bornées à la simple silification : conformément aux principes révélés par les expériences réalisées dans l'eau surchauffée de Sérarmont, il s'est constitué des familles entières de minéraux cristallisés par l'arrangement des éléments en présence. C'est ainsi qu'ont pris naissance la chamosite, la berthierine, la chlorite, dont les oolites sont si souvent chargées et les cristaux microscopiques de magnétite et d'autres espèces, dont la genèse n'a plus que des rapports très éloignés avec celle de la limonite qui est notre objet principal.

Avant d'aller plus loin, je ferai remarquer que les conclusions générales auxquelles nous sommes amené ainsi par l'étude du fer oolithique de Lorraine, rappellent des opinions adoptées par plusieurs observateurs depuis l'époque de mes premières recherches.

Par exemple, M. Camusat<sup>(1)</sup>, qui a surtout étudié le gisement de Mazenay (Saône-et-Loire), regarde le minerai comme résultant

(1) *Comptes rendus du Congrès des Sociétés savantes*, tenu à Nancy en 1901, page 196.

des phénomènes secondaires. D'après lui, la limonite dériverait d'une solution ferrugineuse existant normalement dans le sédiment, mais enrichie par des suintements provenant des assises superposées.

M. Cayeux, de son côté, étudiant des minerais de fer subordonnés aux couches paléozoïques, voit dans ceux qui se montrent dans les Ardennes et en Bretagne « d'anciennes oolites calcaires auxquelles des débris végétaux aursient servi de centres et dont la calcite se serait vue remplacée, en tout ou en partie, par la chlorite, la magnétite, l'oligiste ; ce dernier minéral provenant d'une transformation de la chlorite » (1).

D'après ce qui précède, on voit que notre opinion est, tout au contraire, que les oolites calcaires ont dû être transformées d'abord en limonite, qui, plus tard et par les voies ordinaires du métamorphisme, est devenue de l'oligiste, puis subsidiairement de la magnétite, pendant qu'une autre partie, non plus comme pour ces derniers oxydes par le dispositif de Gay-Lussac ou fumarollien, mais par celui de Sénarmont ou bathydrigue, entretrait dans la constitution des silicates.

Le même auteur est revenu bien plus récemment sur l'évolution minéralogique des minerais de fer oolithiques primaires de France (2). On peut croire que c'est par l'étude des minerais moins anciens et spécialement par ceux du Lorrain qu'il fallait, comme nous l'avons fait, commencer ce travail, pour n'arriver aux minerais primaires qu'avec l'appui de données infiniment plus aisées à dégager de l'infinité série des phénomènes superposés.

Mais il nous reste encore un point à aborder pour ne rien laisser de côté dans cette étude, d'ailleurs extrêmement résumée, du minerai de fer de Lorraine. Il s'agit cette fois du *fer fort* dont nous avons vu qu'il constitue comme une sorte d'appendice des gisements oolithiques.

En beaucoup de régions de Lorraine, par exemple sur les plateaux situés entre Aboncourt et Beuvezin, on trouve des calcaires bajociens corrodés depuis longtemps par les eaux sauvages

(1) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXXVII, 1120, 1898. (J'avais signalé l'origine possible par épigénie du fer en grains et de la bauxite dès 1882. *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, XCVI, 1787.)

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXLIX, 1388, 1900.

qui ont élargi les fissures jusqu'à en faire des crevasses dont les deux lèvres sont écartées l'une de l'autre de plusieurs mètres et qui viennent intéresser les assises du calcaire toarcien. Ces sillons ont acquis, du fait de l'intempérisme, des détails très intéressants au point de vue de l'histoire des minerais de fer : en effet, le calcaire toarcien sous-jacent a été dissous et les oolites ferrugineuses, qui y sont très lâchement disséminées, s'y sont concentrées de façon à constituer un gîte de remaniement, qui fut exploité à une certaine époque.

Dans la région médiane du bassin de Longwy et d'Esch, le fer fort constitue de puissants dépôts, par exemple à Saint-Pancré et à Aumetz, comme les dépôts de fer en grains de Lay-Saint-Christophe, de Chavigny et de Malzéville signalent la région centrale du bassin de Nancy.

Saint-Pancré, que nous avons précédemment décrit, mérite d'être considéré comme la localité typique à ce point de vue<sup>(1)</sup>. Bleicher a fait à l'égard du fer fort des observations très intéressantes<sup>(2)</sup>. Le point principal est qu'il rattache la forme des gîtes aux phénomènes de la dénudation subaérienne. Seulement il n'y a pas suffisamment distingué plusieurs temps successifs et c'est inexactement qu'il attribue à la dénudation la production même des pisolithes contenues dans les gisements<sup>(3)</sup>.

L'examen de cette localité, rapproché de celui des points analogues dans le Cher et dans le canton de Berne, m'a montré qu'il s'agit très vraisemblablement de cavernes tapissées de résidus de dissolution des parois, mais remontant à une époque relativement très reculée. Pour la forme des cavités devenues sidérolithiques, on ne peut qu'être frappé de leur analogie avec les couloirs tracés par la pluie et les eaux de ruissellement à la surface et dans l'épaisseur de calcaires dans une foule de pays, entre autres dans le Jura méridional. Autour d'Artemare (Ain), par exemple, on en voit de toutes les dimensions et on trouve dans leur fond des argiles et des sables de décalcification. Si la ressemblance est moins intime en ce qui touche la composition, c'est que ces calcaires ne sont point ferrugineux. Mais il ne manque pas de

(1) On a sur cette localité un excellent travail de Jaquet, qui fut inspecteur général des mines.

(2) *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*, CXXX, p. 546 et 598, 1900.

(3) *Bollettino de la Società Italiana di Geologia*, XIII, p. 182, 1900.



cavernes plus avancées que ces embryons du Val Romey, où le fer est bien visible, et même c'est un trait ordinaire des cavernes que la présence de l'oxyde de fer colorant un limon rouge sur lequel on a fait du reste bien des suppositions non vérifiées. De toutes parts, les puits naturels sont remplis d'argile rubéfiée dont la couleur rutilante les rend d'autant plus visibles sur les coupes qui les traversent.

On peut donc en toute assurance, et aussi à cause des vestiges organisés qu'on y rencontre, affirmer que les couloirs de Saint-Pancré et des localités analogues sont des cavernes.

Ce point est d'un haut intérêt, car, jusqu'ici au moins, nous ne connaissons qu'un agent capable de perforer les calcaires pour y ouvrir des couloirs et des puits : c'est l'eau chargée d'anhydrite carbonique ; c'est la pluie ou c'est la rivière ; c'est en tout cas le *régime continental*. Il faut donc que les points comme Saint-Pancré, où ces cavernes se trouvent, aient été exondés à l'époque du creusement de celles-ci, aient joui du régime continental ou subaérien.

On peut aller plus loin et reconnaître que cette époque de régime continental est certainement ancienne, car, en appliquant les notions obtenues plus haut à l'égard du fer oolithique, nous voyons qu'il faut laisser au phénomène le temps de se compléter par des travaux intimes correspondant à ceux de tout à l'heure. Il faut que les couches corrodées, s'étant affaissées sous la mer et ayant été recouvertes de sédiments convenablement épais, aient été le théâtre de circulations bathydrïques (\*). Alors les débris accumulés dans les perforations, calcaires encore, mais surtout argileux et sableux, ont livré passage à des dissolutions chaudes et plus ou moins compliquées. C'est ainsi qu'il s'est réalisé des concentrations autour de certains points et vraisemblablement des pisolithes calcaires qui ont été ensuite ferruginisés. C'est à cause de ces circonstances que Virlet d'Aoust a rencontré dans des poches sidérolithiques de Franche-Comté des pisolithes volumineuses au travers desquelles s'est conservée la structure des lits de limon où elles étaient empâtées.

Dans la région lorraine, le recouvrement du terrain bajocien dans lequel sont creusés les pertuis a été supprimé par la dénu-

(\*) Voir *La Géologie générale*, 2<sup>e</sup> édit., 2. 82, 1 vol. in-8. Paris, 1909.



dation encore en cours et qui peut, comme l'a vu Bleicher, accumuler dans telle ou telle localité de vrais gîtes de fer par lavage. Mais en diverses régions, par exemple à Dun-le-Roi, dans le département du Cher, on voit d'épais sédiments tertiaires parfaitement réglés surmonter le jurassique corrodé. A Saint-Pancré, des couloirs souterrains réunissent parfois des poches fort distantes et dans le Gard (\*) comme dans le Lancashire, aux environs d'Ulver-Stone, le minerai remplit des cheminées si profondes que pour les expliquer on a eu quelquefois recours (à l'exemple de Greppin et d'autres géologues suisses) à l'intervention de phénomènes geysériens. Si le calcaire grossier de la gare d'Ivry, à Paris, était recouvert de sédiments suffisamment épais, ses *puits naturels* se transformeraient sans aucun doute en gîtes sidérolithiques.

### RÉSUMÉ ET CONCLUSIONS

En résumé, l'histoire géologique des minerais de feroolithique de la Lorraine et de beaucoup d'autres pays qui sont construits comme elle, se signale par le nombre des réactions qui y ont successivement pris part. Elle contraste beaucoup à cet égard avec les suppositions qu'on avait crues légitimes à première vue et qui reportaient tous les détails de la production à l'époque même où l'on classe les assises auxquelles le minerai est subordonné. Ces assises étant qualifiées de toarciennes, parce qu'elles sont intercalées entre d'autres dites charnoouthiennes et bajociennes, on ne mettait pas en doute que la mer toarcienne n'ait présidé elle-même au dépôt des oolithes avec tous les détails de composition et de forme.

Au lieu de cette manière de voir si simple et qui dérive de l'idée que les profondeurs de la Terre sont le domaine du repos absolu et constituant, suivant le mot de Buffon, un bureau d'Archives où sont conservées sans altération des traces de tous les phénomènes accomplis successivement à la surface; au lieu de cette doctrine, nous sommes forcé de reconnaître que les couches du sol sont le théâtre d'une activité si grande et si incessante qu'on peut douter que, dans une assise toarcienne, par

(\*) *Description géologique du Gard*, par Émilien Douas, p. 337.

exemple, il reste grand'chose des matériaux du début. Les matières ont changé de structure, elles ont réagi chimiquement les unes sur les autres. La couche considérée a cédé de sa substance aux fluides qui ont circulé à son contact; elle a parfois reçu de la même source de la substance nouvelle. Suivant le signe arithmétique des différences ainsi réalisées, elle a pu se gonfler ou se réduire; elle a pu se réduire jusqu'à disparaître. Et toute cette activité dérive, en dernière analyse, du foyer d'énergie que notre globe renferme dans son sein et qui est le résidu de l'énergie emmagasinée à l'origine dans la nébuleuse devenue la Terre. A cette activité propre, s'en joint d'ailleurs souvent une autre qui dérive du Soleil et c'est par le groupement indéfiniment varié de toutes ces causes complémentaires et concordantes (malgré leur première apparence de conflit) que notre globe parcourt les phases successives de la majestueuse évolution planétaire qui n'est qu'un exemplaire, à une échelle particulière, de l'évolution de toutes choses.