M. Klein tient à relever à l'occasion du centenaire de la mort de Gœthe le rôle important que ce génie a joué dans le développement des sciences naturelles. L'esprit de Gœthe est caractérisé par la direction nettement positive, basée sur l'observation qu'il suit dans le développement de ses idées philosophiques. Gœthe est ainsi à considérer comme un précurseur de Lamarck et de Darwin. Dans cet ordre d'idées M. Klein parle de Gœthe comme biologiste et en mentionne les recherches scientifiques sur la plante, les métamorphoses en botanique et la découverte de l'os intermaxillaire si importante pour l'anatomie animale et humaine.

La constitution et le mode de formation des minerais oolithiques en Lorraine et au Luxembourg

par **J. P. AREND**

(Suite)

3. *Les recherches sur le mode de formation des minerais oolithiques*

Les recherches les plus diverses, s'espaçant sur la période de 1827 à 1932, n'arrivaient pas à préciser le mode de formation des minerais oolithiques, ni même à réduire le nombre des inconnues du problème.

Celui-ci restait donc posé dans l'intégralité de ses possibilités que deux principes différents orientaient:

a. La formation directe, primaire, par une sédimentation directe, lacustre.

b. La formation indirecte, secondaire, par une minéralisation subséquente des oolithes calcaires «en place» par l'intermédiaire de solutions ferrugineuses.

a. *Les variantes de la formation directe*

La présence de fragments zoolithes et de débris de bois dans le minerai constitue, d'après E. Giessler, [22]) une preuve évidente que le minerai s'est formé à l'endroit même où la mer se déleste, c.-à-d. sur la plage. La marée montante y roulant également les oolithes aurait donc assuré, de la façon la plus naturelle, le mélange qui devait constituer nos minerais.

[22]) Giessler E., Das oolithische Eisensteinvorkommen in Deutsch-Lothringen. Zeitschrift für Berg-, Hütten- und Salinenwesen im preussischen Staate, 1875, XXIII, 9—41.

A l'origine de l'oolithe, Giessler met l'hydrate ferrique qui s'est précipité, de façon continue, dans les eaux de mer ferrugineuses. La teneur élevée en fer y a été maintenue par les apports constants que devait fournir le lessivage intense des couches jurassiques adjacentes.

Au sujet de cette théorie il est à faire remarquer que Giessler, et d'ailleurs tous les partisans de la formation primaire des minerais, invoquent, juqu'à ce jour, le jeu des flots pour expliquer, soit la présence de fragments détritiques dans les couches, soit la structure de l'oolithe et plus particulièrement l'alternance des couches superposées concentriquement autour d'un grain central, soit enfin la forme ovoïde ou arrondie de l'oolithe même.

A-t-il existé, ce jeu mystique des flots, et a-t-il pu exister?

Réellement, jusqu'à ce jour, aucune observation concrète n'a pu le prouver. Bien au contraire, toutes les observations raisonnées concourent à la preuve négative, excluant même toute possibilité de son existence.

Il y a d'abord la dimension étroite du bassin de sédimentation; il y a absence de gravier; il y a même absence de strates triées et démêlées, se produisant dans le moindre va-et-vient des eaux; il n'y a aucune démolition d'oolithes, qui aurait été inévitable dans le remous des bassins d'accumulation supposés. Et nulle part on ne constate un démêlement quelconque entre l'oolithe pesant et le grain de gangue léger.

A la netteté de ces arguments s'opposent, dans ce qui suit, les points de vue hypothétiques des partisans de la formation primaire. De cette façon nous reconnaîtrons même dans l'aspect général du problème toutes les conséquences scientifiques et économiques qu'il comporte.

Braconnier [13]) accepte les vues exprimées par E. Giessler, en réservant, toutefois, au fer l'origine thermale.

L. Hoffmann [23]) se rallie aux conceptions de Giessler. Il admet la formation littorale des couches ferrugineuses. Il explique la formation de l'oolithe par la précipitation de l'hydrate ferrique autour d'un grain de sable soulevé et flottant, sa structure concentrique par les changements successifs de régime, son aspect luisant par le frottement réciproque et le mouvement des eaux. Si la précipitation de l'hydrate ferrique l'emporte sur les apports mécaniques,

[13]) loc. cit.

[23]) Hoffmann L. Das Vorkommen der ool. Eisenerze in Luxemburg und Lothringen. Verhandl. naturh. Ver. preuss. Rheinland, Westfalen, usw. 55. Jahrgang, 1898, 109—133.

il y a formation de minerais; si ceux-là prédominent, les intermédiaires stériles se forment.

Certains enrichissements locaux des couches à proximité du littoral de certaines failles nourricières ont été mis, pour la première fois, en rapport avec les sources thermales par Villain.[24, 25, 26]) Egalement sous l'influence des courants ferrugineux, des cônes d'oxyde de fer se seraient formés, à l'exemple de celui de Landres-Barancourt. La partie médiane, formée presque exclusivement d'oxyde ferrique pur, passe insensiblement au stérile, conformément au degré de dilution du courant générateur.

Il est pour le moins étonnant que ces indications n'aient pas trouvé plus de considération dans les milieux intéressés.

Dans un article circonstancié, Lang,[27]) analysant les théories de Giessler, Braconnier, Hoffmann et Villain, conclut à l'impossibilité de pouvoir se décider pour un mode quelconque, primaire ou secondaire. «Il manque toujours, dit-il, des preuves éloquentes, persuasives, en faveur de l'une ou de l'autre théorie». Et plus loin: «Si la richesse des minerais est liée aux failles et déterminée par les rejets, c'est bien là une preuve décisive pour la formation secondaire et non, comme le préconise Villain, pour le dépôt primaire. Si, au contraire, on arrive à démontrer que la richesse et la puissance des couches suivent la direction des anciens courants ferrugineux, alors seulement on peut conclure à un dépôt primaire.»

En 1903, van Werveke[14]) se déclare pour la formation primaire, parce que la régularité des couches lui semble exclure tout autre mode de formation.

Mais il fait ses réserves.

Les enrichissements en fer qu'il a constatés à la minière Friede à Knutange ne sont pas du même âge que les couches, mais de formation plus récente. Le rapport que Villain établit à Audun-le-

---

[24]) Villain P. Sur la genèse des minerais de fer dans la région lorraine. Comptes rendus de l'Académie des Sciences, Paris. 1899, CXXVIII, 1291—1293.

[25]) Villain P. Note sur le gisement de minerai de fer du département de Meurthe-et-Moselle. Bull .Soc. belge de Géol., de Paléont. et d'Hydrologie. Bruxelles 1900, XIII, 116—127.

[26]) Villain P. Sur le gisement de minerais de fer en Meurthe-et-Moselle. Bull. Soc. industr. Est 1900.

[27]) Lang O. Die Bildung der oolithischen Eisenerze Lothringens. Stahl & Eisen, 1899, Nr. 15.

[14]) loc. cit.

Tiche entre la puissance des couches et l'importance de la faille, ne lui paraît pas heureux. Si les minerais sont bien développés le long de la grande faille, c'est que les intermédiaires ne le sont pas moins; à Obercorn, les minerais sont aux intermédiaires comme 13.8 : 11.9, à Esch comme 21.1 : 32.8. Et van Werveke de conclure que la puissance des couches à Esch et à Audun est bien la conséquence d'un développement plus puissant de la formation minière, et non l'effet d'une faille plus puissante.

L'auteur fixe son point de vue.

Le minerai oolithique est un sédiment lacustre, formé par les apports des ruisseaux. Les composés du fer se déposaient sous différentes formes: à l'exemple de la glauconie comme silicate, puis comme carbonate, comme sulfure et sesquioxyde, et enfin dans les couches supérieures comme hydrate. La précipitation chimique, supposée prédominante, assure le dépôt d'une couche de minerai, tandis que l'affluence des sédiments sableux et marneux aboutit aux intermédiaires stériles. L'alternance même de ces phénomènes devait se régler sur le déplacement de la côte et le jeu des soulèvements et affaissements.

D'après Cayeux, [10]) au contraire, tous les minerais oolithiques, d'âge mésozoïque, ont été engendrés en deux temps: le premier correspond à la formation des oolithes et à la minéralisation des organismes, le second à la genèse du ciment.

Gaub [28]) se prononce également en faveur de la formation primaire, parce que le foraminifère Ophtalemidium oolithicum fait défaut dans l'oolithe ferrugineux, tandis qu'il abonde dans l'oolithe calcareux. Schleh [29]) et d'autres géologues allemands se rallient à cette façon de voir.

b. *La formation secondaire métasomatique*

En 1874, Haniel [30]) admet, par l'intermédiaire d'eaux ferrugineuses carbonatées, la substitution directe de l'hématite au carbonate de chaux des couches en place.

---

[10]) loc. cit. page 930.

[28]) Gaub F. Jurassische Oolithe, Tübinger Dissertation, 1910.

[29]) Schleh F. Eine Studie über den Braun-Jura B im nordöstlichen Schwaben und seine Eisenoolithflötze. Abhandlungen zur praktischen Geologie und Bergwirtschaftslehre. Bd. 11.

[30]) Haniel J. Über das Auftreten und die Verbreitung des Eisensteins in den Jura-Ablagerungen Deutschlands. Zeitschrift der deutschen Geol. Gesellschaft. 1874, XXVI, 59—111.

Hoffmann [23]) et Anzel [31]) sont disposés à admettre encore la possibilité d'une hématisation intégrale d'une couche calcaire, mais ce qu'ils ne peuvent pas concevoir, c'est le choix d'une partie seulement d'une même roche, voire de l'oolithe calcaire. Comment expliquer que le ciment calcaire qui baigne l'oolithe également calcaire ne soit pas touché d'une hématisation qui transforme l'oolithe calcaire en oolithe ferrugineux? Les auteurs finissent par invoquer la régularité des couches et l'aspect luisant des oolithes comme autant de preuves manifestes de la formation primaire.

Mais les observations de Bleicher [32]) ne laissent aucun doute sur la possibilité d'une hématisation localisée aux oolithes, fait qui s'explique d'ailleurs très bien par les différences cristallographiques entre l'oolithe et le ciment.

Meunier, [33]) le partisan le plus représentatif de la formation secondaire, accentue les observations de Bleicher par des expériences de laboratoire.

Par ailleurs le nombre des observations en faveur de l'épigénie des couches calcaires augmente. Des couches de calcaire contiennent des couches de minerais identiquement constituées et les oolithes calcareux sont de même structure que les oolithes ferrugineux. Puis on observe des oolithes calcareux en formation, tandis que nulle part on ne constate la formation directe d'oolithes ferrugineux.

Hummel [34]) établit la théorie de la métasomatose syngénétique, c.-à-d. de l'hématisation dans le statu nascendi des oolithes calcareux. C'est plutôt une complication. Aussi est-il remarquable que, dans les dernières années, le nombre des adhérents à la formation secondaire, métasomatique, ait fortement augmenté, quoique ce mode de formation résiste aussi peu à l'analyse logique que celui de la sédimentation directe, primaire.

---

[23]) loc. cit.

[31]) Anzel. Die oolithische Eisenerzformation Deutsch-Lothringens. Zeitschrift für praktische Geologie, 1901, 81—94.

[32]) Bleicher. Sur les phénomènes de métamorphisme, de production de minerais de fer, consécutifs à la dénudation du plateau de Haye (Meurthe-et-Moselle). Bull. Soc. Belge de Géol. XIII (1899, p. 187—189). Comptes rendus de l'Académie, Paris, 1900, 5 février.

[33]) Meunier St. Les gîtes minéraux (Dunod 1919, p. 148—149).

[34]) Hummel K. Die Entstehung eisenreicher Gesteine durch Halmyrolyse (= submarine Gesteinszersetzung). Geologische Rundschau, 1922.

S'est-on jamais bien rendu compte de l'amplitude de ces conditions nourricières dans un bassin étanche, de ce déplacement de millions de tonnes de fer? Et où placer leur origine? Si elle a été thermale, c.-à-d. à affluence localisée, comment la faire s'accorder avec l'uniformité et la continuité des profils? Si, au contraire, on met le fer en rapport, soit avec le lessivage, soit avec des affluents hypothétiques, comment faire concorder les tonnages avec la nature chimique et stratigraphique en cause?

4. *Le métamorphisme et le facies des couches*

L'expression de métamorphisme est admise, comme nous le savons, pour désigner l'ensemble des modifications éprouvées par les roches postérieurement à leur dépôt. Mais comme les relations génétiques du dépôt lui-même sont manifestement inexactes, il manque toute possibilité de faire une distinction entre les phénomènes primaires de formation et les phénomènes métamorphiques.

Cette distinction seule aurait permis de poser les déterminantes du métamorphisme qui sont également celles du facies des couches.

De cette impossibilité de reconnaître dans le désarroi des faits les relations causales est né un état particulier d'empirisme et de stérilité.

5. *L'origine du fer*

Jamais l'origine du fer n'a été traitée pour elle-même, comme un moyen d'orienter ou de préciser le mode de formation des minerais. C'est plutôt le contraire qu'on pratiquait. Chaque nouvelle théorie sur la formation des minerais arrivait infailliblement à admettre les particularités du mode d'origine qui servait le mieux ses intérêts. Tour à tour on invoquait l'intervention des rivières, du lessivage, de chaînes de montagnes disparues, de sources thermales.

Villain, [24]) au fond, était le seul à reconnaître certaines relations entre les couches de minerai et l'origine thermale du fer. Mais comme ses observations, et surtout ses déductions, s'accordent mal avec le découlement général des phénomènes, elles se perdaient dans le désarroi des opinions sans les féconder.

Chapitre 2

Une nouvelle théorie sur la genèse de l'oolithe et la question de l'origine du fer

L'étude de nos formations minières nous a fait admettre que c'est l'oolithe qui doit tenir la clef de l'énigme. Une fois sa genèse

[24]) loc. cit.

établie, on reconnaîtra la forme du fer qui lui a donné naissance et aussi son rôle dans la formation des minerais.

Ce point de vue a été confirmé dans la suite.

Une série d'études pétrographiques effectuées sur les couches et les intermédiaires du domaine minier des sociétés Arbed et Terres Rouges nous a conduit à des observations qui, bientôt, se sont condensées dans les lois suivantes:

1. — L'oolithe ne prend naissance que dans un milieu calcaire relativement pur.

2. — La forme de l'oolithe dépend de la nature de la gangue; sa grandeur dépend des conditions de milieu et d'oxydation.

3. — La composition de l'oolithe est pratiquement constante dans les différentes couches; elle est indépendante aussi bien de la richesse des minerais que de la nature des couches.

4. — Le ciment normal enveloppant l'oolithe ne contient jamais de gels *ferriques* qui sont toujours incorporés dans l'oolithe même.

5. — Un milieu impur, envahi par de petits fragments de quartz ou d'argile, ne se prête pas à la formation d'oolithes.

6. — L'épisode génétique des oolithes est invariable pour toutes les couches.

7. — Le nombre des oolithes est toujours en relation étroite avec la nature du ciment.

Des relations aussi précises et logiques ne s'établissent pas dans les accidents d'une sédimentation littorale ou dans l'irrégularité d'une substitution incertaine. Elles ont plutôt l'ampleur de rapports génétiques, dans l'interdépendance desquelles l'oolithe a dû naître.

Et, effectivement, l'oolithe s'est formé «sur place».

En conformant les énoncés ci-dessus, qui ont force de lois, à leurs rapports physico-chimiques, les contours de la synthèse colloïdale apparaissent. Il n'y a même aucune autre possibilité. Les relations des oolithes avec leur cadre invariablement calcareux, les dépendances de la forme et de la grandeur, la répartition judicieuse des oolithes et leur composition constante, l'absence de gel ferrique dans le ciment, l'absence d'oolithes dans un milieu impur sui generis, l'invariabilité de tous ces faits dans toutes les couches, en font autant de preuves de la formation colloïdale.

La reconstitution des faits devient nette, la succession évidente.

L'invariabilité des relations dans les différentes couches des minerais implique la présence d'une matière première identique et invariable, donc d'origine constante et permettant, en toutes conditions, le déroulement des réactions colloïdales. A ces dernières

fins, les molécules complexes des hydrocarbonates conviennent le mieux. De plus, il faut que le système ne soit pas trop dilué par des corps inactifs entravant le déplacement du sol dans l'ambiance solide.

D'un autre côté, nous [35]) avons constaté que l'oolithe se compose essentiellement et invariablement de gel ferrique et que le ciment normal qui baigne l'oolithe en est exempt. Ces observations donnent au mécanisme de la réaction le caractère d'une oxydation qui, enfin, retrouve des conditions optima dans le cadre d'une double décomposition.

Des différentes possibilités d'expression, nous donnons la suivante:

$$2\,Fe\,H_2\,(CO_3)_2 + CaH_2\,(CO_3)_2 + O = 2\,Fe\,(OH)_3 + CaCO_3 + 5\,CO_2$$

Mais on ne nous demande pas seulement d'indiquer une réaction possible au point de vue de la dynamique chimique, on exige encore que la réaction soit localisée, que ses produits se superposent concentriquement et qu'ils aboutissent à une forme ovoïde.

C'est dire que la double décomposition réclame, en dehors de l'oxygène qui règle et entretient la croissance, un autre agent, plus secondaire, il est vrai, mais absolument nécessaire pour localiser la rupture de l'équilibre du système à des endroits déterminés et uniformément répartis.

Cet agent a été trouvé dans les phosphates de chaux.

Son rôle a été établi par les essais suivants: 50 cm³ d'une solution de sel de Mohr 25 g/litre ont été agités pendant 15 minutes, au contact de l'air, avec des additions variées de phosphates. Le rôle de quantités minimes des phosphates dans un milieu hydrocarbonaté ressort nettement de ces expériences.

				Degré d'oxyd. en %
50 cm³ de sel de Mohr				0
idem	+ 1 g Ca + CO_3			48,8
idem	idem	+ 0,01 g $Ca_3(PO_4)_2$		46,0
idem	idem	+ 0,05 g idem		44,6
idem	idem	+ 1 g $NaHCO_3$		66,5
idem	idem	idem	+ 0.01 g $Ca_3(PO_4)_2$	77,6
idem	idem		+ 0.05 g „	87,1
idem	idem		+ 0,50 g „	90,8

[35]) Arend J. P. La constitution des minerais oolithiques et ses rapports avec le facies, des couches. Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris. 194, 1932, p. 736.

La solubilité restreinte et limitée des phosphates convient particulièrement à créer des centres de concentration progressive, orientant d'abord et localisant ensuite la rupture d'équilibre préconisée. D'autre part la répartition des nodules phosphatés microscopiques atteint un degré d'uniformité presque mathématique, puisqu'elle s'est opérée en fonction d'un équilibre chimico-physique.

Les phosphates proviennent, dans leur intégralité, d'une faune exubérante qui s'est consommée dans le dépôt ferrugineux et que la surface de celui-ci avait vu naître et mourir. A ce moment l'épaisseur du dépôt ne cessait de s'accroître. Les eaux qui lui donnaient naissance étaient, ainsi que nous le prouverons plus loin, de la même origine et probablement de la même composition que les eaux de Mondorf. L'oxygène de l'air que ces eaux dissolvaient au simple contact délogeait les composés hydrocarbonatés du fer d'après les mêmes équations que celles qui se répètent encore aujourd'hui dans les écouloirs et les piscines de Mondorf-les-Bains. En ces temps reculés, tout comme aujourd'hui, le dépôt dosait à peu près:

SiO_2 crist. + am.	6,54 %
FeO	0,23
Fe_2O_3	76,94
Al_2O_3	—
CaO	3,42
MgO	0,14
MnO_2	0,047
SO_3	tr.
CO_2	2,18
Cl	0,099
As_2O_3	0,489
P_2O_5	0,046
V_2O_5	—
H_2O	9,40

Les eaux thermales de la période toarcienne provenaient du bassin géologique qui, aujourd'hui encore, alimente les sources de Mondorf. Le bassin n'est pas localisé dans le grès bigarré, comme on l'a admis erronément jusqu'à ce jour. Mais nous nous occuperons de cette question dans le prochain numéro. Revenons en attendant au dépôt original de nos minerais oolithiques.

La sédimentation lente du précipité ferrique des eaux thermales n'incommodait pas la croissance d'organismes qui s'effectuait dans les conditions les plus propices que la nature ait jamais pu réunir. Les poissons, les mollusques, les crinoïdes, les foraminifères prenaient un développement inconnu jusque là .Les cadavres finissant

par devenir un constituant essentiel du dépôt se couvraient d'un linceul ferrugineux. Et la vie continua sur leur tombe pendant toute une période géologique. La constitution physique du dépôt ainsi formé se prêtait bien à la réduction totale qu'exigeait l'oolithification oxydatrice. La putréfaction de la faune était lente. Avec elle s'opérait d'abord la réduction, puis la préparation physico-chimique à cet état particulier, colloïdal, que réclamait la genèse de l'oolithe:

Une suspension colloïdale, un mélange composé essentiellement d'hydrocarbonates et de carbonates de fer et de chaux, de silice et d'alumine colloïdale, de phosphates, maintenant en suspension des corps inactifs, du quartz clastique, des schistes, puis



Fig. 1.

des restes zoolithes en très grandes quantités. Le magma est stable aussi longtemps qu'il reste à l'abri de l'oxygène de l'air. A son premier contact avec celui-ci la première rupture d'équilibre se produit à l'endroit de la plus grande concentration des phosphates, c.-à-d. au proche voisinage du nodule phosphaté ordinairement microscopique. La première micelle ferrique se dépose sur le

support qui est au potentiel le plus favorable, et ainsi se constitue le point central de l'oolithe futur.

A partir de ce moment, les phénomènes d'absorption s'accentuent et s'accroissent en ampleur. Ils sont complexes et non encore étudiés dans les solutions solides, mais il n'y a pas de doute que les lois des systèmes liquides s'y retrouvent. Nous reviendrons ailleurs sur cette question.

Entre temps nous nous bornerons à reconnaître que la dépression osmotique de la surface active de la micelle ou de la surface croissante de l'oolithe oriente le flux des granules dans des conditions particulièrement sensibilisées par la présence simultanée d'hydrate ferrique, d'hydrate d'alumine et de silice active.

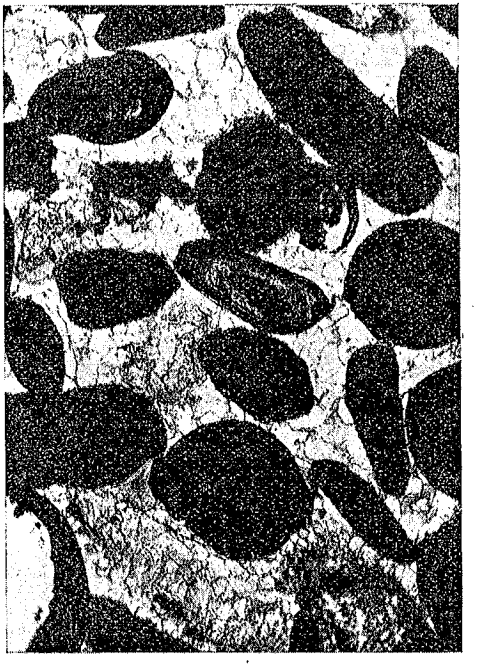


Fig. 2.

Ces trois composés peuvent avoir un signe ou l'autre, suivant le cas, ou plus exactement leurs granules respectifs peuvent, suivant la réaction du milieu où ils se trouvent, se mouvoir vers un pôle ou vers l'autre de la micelle électrolytiquement dissociée.

Cette façon d'entrevoir les choses explique d'ailleurs parfaitement l'alternance des couches concentriques de l'oolithe que nous

reconnaissons particulièrement bien dans la fig. 1, d'un minerai de couche inférieure, où l'oxygène avait difficilement accès. La fig. 2 illustre le cas où l'oxygène était suffisant pour réaliser l'oxydation complète, c.-à-d. pour faire transporter tout le fer, sous la forme la plus oxydée, dans l'oolithe même. Dans le cas de la fig. 1 le ciment, solution intermicellaire, contient encore une partie de fer sous forme d'oxyde ferreux en solution; dans le cas de la fig. 2 le ciment, pratiquement exempt d'oxyde ferreux, ne contient plus que de la calcite pure.

Sur ces réactions principales entre les trois constituants essentiels l'hydrate ferrique, l'hydrate d'alumine et la silice active, se greffent les réactions secondaires qui jouent principalement entre les phosphates et la silice. Leurs produits, associés à l'acide carbonique libéré au cours de la réaction, maintiennent la pellicule extérieure de l'oolithe croissant dans un état suffisamment acide pour mouler l'oolithe dans le ciment qui l'enveloppe. La vitesse de ce moulage est réglée par la croissance de l'oolithe même. Celle-ci dépend, en première ligne, comme nous l'avons vu, de l'oxygène actif.

L'acide carbonique produit au cours de la réaction et se dégageant autour des surfaces actives ne cesse de maintenir les zones voisines dans cet état hydrocarbonaté qui convient le mieux au flux des granules en solution solide. Son excédent, par contre, oblige l'oxygène infiltré à se glisser vers des centres de moindre activité. Outre les nombreuses fonctions plus connues qui lui seront encore attribuées au cours de cette étude, l'acide carbonique règle automatiquement la répartition judicieuse d'un travail gigantesque.

Ce sont ces interdépendances qui, en relation avec la composition intermicellaire, déterminent, outre la forme et le nombre des oolithes, la constitution même des formations oolithiques en général, tant ferrugineuses que calcaires. *(A suivre.)*

Une rare capture ornithologique dans notre pays.

Par V. FERRANT.

Chassant le 15 septembre 1930 aux environs de Filsdorf, M. Edouard Ferrant avait la bonne fortune d'abattre sur la route qui conduit à Hassel, un Faucon Kobez, Tinnunculus verspertinus (Lin.) mâle jeune âge. L'exemplaire dont s'agit se trouvait en société