

SÉANCE MENSUELLE DU 17 DÉCEMBRE 1946.

Présidence de M. M. ROBERT, président.

Devant l'Assemblée debout, le Président annonce la mort de notre collègue et membre du Conseil, M. FERNAND DELHAYE, et rend hommage à sa mémoire dans les termes suivants :

J'ai le triste devoir de vous faire part de la mort de notre collègue FERNAND DELHAYE, membre de notre Société depuis 1906, membre de notre Conseil.

La carrière de Fernand Delhaye est de celles qui font honneur à la science géologique, à laquelle il s'était consacré tout entier. Il appartenait à la grande équipe de géologues formée par Jules Cornet au commencement du siècle. Né à Clermont-Ferrand, de père belge, le 4 février 1880, il sort de l'École des Mines de Mons en 1905 comme ingénieur des mines et en 1907 comme ingénieur-géologue. Il entre ensuite à la Société de Merbes-Sprimont et passe quelques années dans les carrières belges, ce qui lui donne l'occasion d'étudier la formation des récifs de calcaire rouge du Frasnien du Sud du bassin de Dinant et leurs relations avec les Schistes de Matagne qui les environnent. Envoyé en Italie, ses observations dans la région de Carrare sur les dislocations consécutives à la surrection de l'Apennin contribuèrent puissamment à élargir son horizon.

En 1910 il part pour l'Afrique. Il devait, pendant une période de plus de trente années, lui consacrer toutes ses forces, lui dévouer toutes ses qualités d'observateur et tout l'effort de sa pensée. Les missions qu'il accomplit pour le compte du Gouvernement et de divers syndicats miniers le portent principalement sur le pourtour de la cuvette congolaise. De 1910 à 1913, il étudie au Katanga la région effondrée de la Lufira. En 1913 et 1914, il prospecte le Bas-Congo et les régions voisines de l'Afrique équatoriale française. La guerre le rappelle en Europe, mais en 1918-1919 il établit, avec M. Sluys, une carte géologique des formations du Bas et du Moyen-Congo qui restera désormais classique. De 1920 à 1925, il parcourt, avec le regretté chanoine Salée, le Kivu et le Ruanda-Urundi. De cette section du grand graben, où un volcanisme toujours actif souligne les grands effondrements, il rapporte, avec une énorme

documentation, pour la plus grande partie encore inédite, la première carte géologique du pays, document d'une inappréciable valeur. En 1923, on le trouve au Sénégal et au Soudan et, en 1925, au Maroc oriental, où la comparaison des échelles stratigraphiques de part et d'autre de la vallée de la Moulouya lui suggère des vues nouvelles sur l'orogénie du Grand Atlas. En 1927 et jusqu'en 1929, il s'attaque, dans le bassin hydrographique du Kasai et principalement sur le Sankuru, aux forma-



Fernand DELHAYE.

tions récentes du centre de la cuvette congolaise. Il découvre en même temps les relations qui continuent à exister entre l'orientation du réseau hydrographique actuel et les influences épirogéniques profondes qui ont façonné la cuvette congolaise. Ces dernières il les saisira sur le vif au cours des années suivantes, lorsque, en 1930 et 1931, il sera amené à une conception générale de l'édifice africain par la juxtaposition, dans l'Oubangui-Chari, des effondrements du Tchad au vieux bouclier central de l'Afrique dans des conditions qui rappellent, sur un plan plus réduit, ceux du Tanganika et de la côte occidentale.

Les derniers voyages de Fernand Delhaye, en 1936, puis en 1937-1938, ont complété et soudé, pour ainsi dire, le faisceau de ses connaissances en lui faisant reprendre, avec toutes les données nouvelles apportées par l'exploitation minière, la partie orientale de la ceinture, depuis la Rhodésie au Sud jusqu'au Kivu au Nord, en passant par le Katanga et le Maniéma.

La simple énumération de ces voyages, auxquels il faut encore ajouter une mission en Sibérie orientale, accomplie en 1924 pour le compte de la Banque de Bruxelles, à laquelle il était spécialement attaché en qualité d'ingénieur-conseil, montre la surprenante activité de cet infatigable géologue et l'énorme champ d'action sur lequel elle s'est déployée. Il faut ajouter qu'il était scientifiquement armé de pied en cap. Fernand Delhaye était un géologue complet. Aucun aspect du terrain parcouru ne pouvait lui échapper, car il était à la fois stratigraphe, tectonicien, pétrographe et paléontologiste, ayant par surcroît un goût décidé pour le phénomène vivant, la géologie en action, autrement dit la géographie physique.

Tel était le savant et l'ami que nous venons de perdre. La somme d'observations et de matériaux qu'il avait recueillie au cours de sa vie si bien remplie était telle qu'elle lui eût permis de publier sur la géologie de l'Afrique des œuvres maîtresses, de ces œuvres sur lesquelles, génération après génération, on continue à se pencher en les interrogeant. Malheureusement, Delhaye, à l'inverse de beaucoup d'autres, était tenaillé par le démon du scrupule. Il craignait toujours de publier trop hâtivement ce qui était pourtant le fruit d'un travail opiniâtre sur des sujets que nul ne connaissait mieux que lui. Son extrême probité scientifique fait ainsi qu'on ne le connaîtra jamais à sa mesure, qui était grande. Ce qu'il a publié nous apporte des enseignements précieux, mais ne nous livre pas le témoignage d'ensemble qu'on pouvait attendre d'un géologue connaissant à fond l'Afrique pour l'avoir parcourue de bout en bout avec des yeux clairvoyants ⁽¹⁾.

Malgré cette réserve naturelle, sa réputation était grande, tant à l'étranger qu'en Belgique. A son retour du Ruanda-Urundi, en 1923, le Roi Albert avait tenu à l'appeler et à étudier avec lui la carte au 1/200.000^e qu'il venait de dresser avec le chanoine Salée. Il était membre de fondation de l'Institut Royal Colonial, membre de la Commission de Géologie du Ministère des Colonies, membre correspondant de l'Académie des Sciences Coloniales de Paris. Il avait reçu de l'Académie des Sciences de Belgique, avec M. M. Sluys, le Prix de Potter en 1922, et de l'Institut de France, le Prix Wilde en 1923. Il était officier de l'Ordre de la Couronne, chevalier de l'Ordre de Léopold et de l'Ordre Royal du Lion.

(1) Liste des publications à la fin de ce volume.

A la parfaite élévation de pensée et à la modestie qui sont le propre du vrai savant, Fernand Delhaye joignait une bonté et une rectitude foncières qui le maintenaient à l'écart de toutes les intrigues ou compromissions. Son désintéressement était d'une qualité rare. Ses amis pouvaient compter absolument sur lui. Ses collaborateurs étaient assurés de son aide sans réserve. Nombreux sont les jeunes dont il a guidé les premiers pas.

Il s'est éteint brusquement, presque au sortir de sa table de travail, le 15 de ce mois de décembre sans joie, dont l'aigre bise a dû paraître bien rude à celui qui avait tant cheminé sous le glorieux soleil tropical. Sa disparition inattendue nous remplit d'amertume. Son souvenir restera éternellement dans nos cœurs. Nous prions M^{me} Delhaye et ses enfants de recevoir les condoléances émues de notre Société.

L'Assemblée, sur proposition du Président, décide l'admission des membres effectifs suivants :

MM. le Major JULES FLEURY, professeur à l'École Royale Militaire, 115, boulevard Saint-Michel, Etterbeek; présenté par MM. A. Delmer et R. Tavernier.

N. VARLAMOFF, ingénieur des Mines et ingénieur géologue A.I.Lg., 17, rue des Célestins, Liège; présenté par MM. F. Delhaye et J. Lepersonne.

PROSPER SCHNOCK, ingénieur au Service géologique du Congo belge, à Léopoldville; présenté par MM. F. Corin et F. Kaisin.

SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL de et à LÉOPOLDVILLE; présenté par MM. F. Corin et J. Lepersonne.

SERVICE GÉOLOGIQUE RÉGIONAL de et à COSTERMANSVILLE; présenté par MM. R. De Dycker et A. Jamotte.

Dons et envois reçus :

9577 *Camerman, C.* Phénomènes de sulfatation dans des maçonneries en briques de Boom. Bruxelles, 1946. 59 pages.

9578 *Hacquart, A.* Natural Sciences in Belgium during the War. A series of articles on scientific progress. Gand, 1946, 184 pages.

Communications des membres :

J. DELECOURT. — *Roches éruptives, rayons X et équivalents.*
(Texte ci-après.)

MM. G. Van Esbroeck et M.-E. Denaeyer félicitent successivement M. Delecourt et comparent sa méthode avec celle qui utilise le calcul de la « norme américaine ». Quels que soient les défauts de celle-ci, dit M. Denaeyer, défauts que personne ne conteste, si l'on veut faire un procédé de calcul de la composition minéralogique, elle est tout de même utile en ce sens qu'elle permet de traduire la composition chimique de n'importe quelle roche silicatée alumineuse, en un certain nombre de molécules simples (exprimées ou non minéralogiquement dans la roche), et de s'y référer pour comparer les « potentialités minéralogiques » d'un magma donné. Les échelles thermométriques sont aussi arbitraires et nul n'en conteste l'utilité.

Je crois, ajoute M. Denaeyer, que ce conventionalisme est préférable et plus fructueux que le souci, légitime à un autre point de vue, de calculer la composition minéralogique réelle d'une roche à partir des données analytiques. La norme américaine et les paramètres qu'on en tire sont certainement plus « parlants » que les paramètres de Niggli. Ceux-ci ont cependant l'énorme avantage d'englober la totalité des roches et non pas seulement les silicatées alumineuses.

Enfin, dit encore M. Denaeyer, la méthode de M. Delecourt me paraît adaptée plus spécialement au problème de la détermination en poids des constituants, et cela est de toute première importance aussi pour le pétrographe qui, lorsqu'il ne se trouve pas dans un cas simple qui permet l'usage de la platine à intégration ou des méthodes de séparation mécanique, toujours longues et parfois compliquées, pourra désormais éviter dans ses calculs les tâtonnements et les approximations.

M. H. Buttgenbach a entendu avec grand intérêt l'exposé de M. J. Delecourt, dont la méthode peut faciliter la détermination des diverses espèces minérales composant une roche; il estime toutefois que cette méthode ne peut remplacer le procédé proposé par les Américains et modifié par M. Lacroix, lequel tend à définir une composition magmatique virtuelle et à aider ainsi la comparaison et la classification des roches éruptives.

J. LEPERSONNE. — *Présentation d'une carte géologique au 1/1.000.000^e du Congo occidental et du Bulletin n° 1 du Service géologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi.*

M. J. Lepersonne présente une carte géologique au 1.000.000^e du Congo occidental qui a fait l'objet d'une communication à la séance du 15 décembre de la Société géologique de Belgique.

Au cours d'un bref commentaire, M. Lepersonne expose que cette carte a été dressée, avec l'aide de L. Cahen, au moyen des documents résultant des levés effectués par les géologues du Service Géologique Régional de Léopoldville de 1940 à 1946; ont été inclus dans les tracés divers éléments fournis par des entreprises privées et des particuliers ainsi que ceux des éléments anciens qui ont pu être interprétés à la lumière des connaissances nouvelles. Ont été laissées en blanc les régions pour lesquelles on ne possède pas de données suffisantes.

Les régions couvertes par la carte englobent tout le Bas-Congo, le Kwango, une partie de l'Ouest du Kasai et le Moyen-Congo jusqu'à Bolobo.

Le fond topographique est celui de la carte au 1.000.000^e dressée pendant la guerre par le Service cartographique et géodésique de la Colonie.

M. Lepersonne situe brièvement les caractéristiques géologiques de chaque région et rappelle les grandes lignes de l'échelle stratigraphique du Congo occidental.

Il présente également aux membres de la Société le *Bulletin* n° 1 du Service géologique du Congo belge et du Ruanda-Urundi, édité à Léopoldville, et qui est distribué actuellement en Belgique. Il expose les rétroactes qui conduisirent à la création de ce bulletin qui doit être publié, en principe, une fois par an et présenter les résultats des travaux des géologues des Services géologiques régionaux de la Colonie. Il donne le sommaire de ce premier numéro et un aperçu sur le contenu du n° 2, qui est à l'impression à Léopoldville.

*
**

Au cours de la discussion qui suit cette présentation, M. Maurice Robert observe que la série schisto-calcaire superposée au conglomérat glaciaire du Bas-Congo est considérée dans la carte géologique comme appartenant au système schisto-dolomitique.

Aussi longtemps qu'il n'est pas prouvé que les algues ont une

valeur décisive au point de vue de la chronologie des terrains, M. Robert ne peut pas accepter ce raccord. A son avis, jusqu'à preuve du contraire, le conglomérat glaciaire du Bas-Congo doit être synchronisé avec le conglomérat glaciaire localisé, au Katanga, entre le système schisto-dolomitique et le système du Kundelungu, et les formations sus-jacentes à ce conglomérat représentent, au Bas-Congo, le système du Kundelungu.

M. Robert observe aussi que dans la série du Bas-Congo qui nous est présentée, d'importantes formations sont rapportées au système des Kibaras. C'est une manière de voir qui, à son avis, ne s'appuie sur aucune donnée décisive. Rien ne prouve que ces couches ne doivent pas être rapportées aux formations du Complexe de base, d'autant plus que, jusqu'à présent, il n'a pas été trouvé de formations pouvant être assimilées aux couches du système des Kibaras le long de la bordure occidentale du continent africain.

*
**

Dans sa réponse, M. Lepersonne s'étonne de l'intervention de M. M. Robert concernant les corrélations entre le Bas-Congo et le Katanga. Il fait remarquer que la carte et son échelle stratigraphique ont un caractère essentiellement local, caractère qui est d'ailleurs le seul qu'il entend donner à sa communication; il a repris notamment les termes de « Système Schisto-Gréseux » et de « Système Schisto-Calcaire » introduits par F. Delhayé et M. Sluys dans leur *Esquisse géologique du Congo occidental*, qui fait toujours autorité et dont les tracés sont à peine modifiés par les travaux récents; il a introduit les termes nouveaux, résultant des travaux de L. Cahen, de « Groupe des Monts de Cristal » et de « Systèmes du Haut-Shiloango et du Mayumbe » pour les terrains sous-jacents à la Tillite du Bas-Congo, sans préjuger de la position de ces formations par rapport à l'échelle d'autres régions de la Colonie et du Katanga notamment.

Pour le surplus, il accepte très volontiers la responsabilité, qu'il partage avec ses collègues A. Jamotte, L. Cahen et G. Mortelmans, d'avoir fourni des arguments nouveaux en faveur d'une des hypothèses de corrélation établies par ses prédécesseurs, fait observer que ce genre de synthèse ne peut à l'heure actuelle être considéré que comme hypothèse de travail sujette à révision constante et répète que, son exposé de ce jour ayant un caractère purement local, il n'y est aucunement question de corrélations.

Roches éruptives, rayons X et équivalents,

par J. DELECOURT.

It will be clear to mineralogists who read these pages that the author knows very little of their subject.

W. L. BRAGG.

Peu de temps avant sa mort héroïque, Valère Billiet publiait dans notre revue un excellent travail sur « Quelques aspects nouveaux de la minéralogie moderne ». Il s'y enthousiasmait, à très juste titre, sur les énormes services qu'avait rendus la diffraction des rayons X lors de la détermination des molécules intégrantes ⁽¹⁾.

En janvier 1946, M. de Béthune exposa, ici même, une très intéressante méthode semi-graphique pour le calcul des feldspaths dans les roches ⁽²⁾.

Ces deux travaux, procédant de doctrines en vérité fort différentes, entraînaient pourtant une même conclusion indirecte.

Pour Valère Billiet : les nombres régissent le monde, mais le régissent sans l'amuser.

Pour M. de Béthune : les calculs sont longs et exigent une attention soutenue qui rebutera le pétrographe impatient de retourner à son microscope.

La détermination de la composition virtuelle ou *normative* des roches éruptives par la méthode américaine n'exige pas de très longs calculs.

En 1924, le professeur Ch. Van Esbroeck nous montra d'ailleurs que le problème normatique pouvait être résolu presque sans calcul, au moyen d'une construction vectorielle très ingénieuse et très simple, à condition toutefois de remplacer les formules moléculaires par des *expressions équivalentaires* ⁽³⁾.

(1) V. BILLIET, Quelques aspects de la Minéralogie moderne (*Bull. Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrog.*, t. LIII, 1944, fasc. 3).

(2) P. DE BÉTHUNE, Une méthode semi-graphique pour le calcul des feldspaths des roches (*Ibidem*, t. LV, 1946).

(3) G.-CH. VAN ESBRÖECK, Diagramme chimico-minéralogique pour la comparaison des analyses des roches éruptives (*Ann. Soc. géol. de Belgique*, t. XLVII, Mém.).

Mais il semble néanmoins que l'étude de la composition virtuelle ou *normative* des roches éruptives par la méthode de Washington ne satisfait plus la totalité des pétrographes. Il existe incontestablement une tendance marquée à se rapprocher de procédés qui donneraient une composition *modale* beaucoup plus voisine de celle de la roche.

A ma connaissance, les essais tentés jusqu'à ce jour ne donnent pas entière satisfaction, précisément parce qu'ils entraînent de longs, je dirai même de pénibles et rebutants calculs.

Je me suis donc demandé si la notion de valence-gramme ⁽⁴⁾ ou, si l'on préfère, d'ion-valence n'arriverait pas à donner la solution du problème tout comme elle avait déjà permis de simplifier l'étude des eaux souterraines et des gîtes salifères.

Le travail qui va suivre n'a d'autre prétention que de donner une idée très sommaire de la notation en milliéquivalents, appliquée aux silicates et aux roches éruptives. C'est en somme une introduction à l'étude équivalentaire de ces roches.

*
**

Le motif de la muscovite admis en 1937 par W. L. Bragg ⁽⁵⁾ était : $K Al_2 (Al Si_3 O_{10}) (O H)_2$.

K et Al_2 y représentaient les cations; $(Al Si_3 O_{10})$ et $(O H)_2$ étaient les anions.

En valences-gramme, nous pouvons écrire :

$\begin{array}{r} V. (Al Si_3 O_{10}) = - 5 \\ V. (O H) = - 2 \\ \hline - 7 \end{array}$	$\begin{array}{r} V. K = + 1 \\ V. Al = + 6 \\ \hline + 7 \end{array}$
--	--

L'ancienne formule de la muscovite était $K Al_3 H_2 (Si_3 O_{12})$.

Elle pouvait se traduire :

$\begin{array}{r} V. Si O_4 = - 12 \\ \hline - 12 \end{array}$	$\begin{array}{r} V. K = + 1 \\ V. Al = + 9 \\ V. H = + 2 \\ \hline + 12 \end{array}$
--	---

⁽⁴⁾ J. DELECOURT, Géochimie des océans, des bassins clos et des gîtes salifères. Mers et lacs contemporains (*Mém. Soc. de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.*, série in-8°, n° 1, 1946; voir pp. 11-18).

⁽⁵⁾ W. L. BRAGG, Atomic structure of minerals (1937, Cornell University Press, Ithaca, New York).

A première vue les deux expressions paraissent très différentes.

Le motif de Bragg indique un silico-aluminate basique au sens chimique du terme. Son radical acide est $(Al Si_3 O_{10})^{-5}$. La formule ancienne avec ces deux valences-gramme hydrogène déterminait un orthosilicate acide.

Mais Al^{+3} , Si^{+4} , K^{+1} et H^{+1} sont tous électro-positifs vis-à-vis de l'oxygène O^{-2} . Nous pouvons dans l'un ou l'autre cas établir l'*analyse élémentaire globale* en valences-gramme de la même façon :

V. O^{-2} = — 24	V. Si^{+4} = + 12
—————	V. Al^{+3} = + 9
— 24	V. K^{+1} = + 1
	V. H^{+1} = + 2
	—————
	+ 24

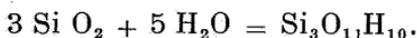
Le motif et la formule sont donc *globalement identiques*. L'analyse élémentaire globale laisse aux X Raymen toute latitude de placer où il leur plaît les éléments dans les réseaux cristallins.

*
**

Les analyses de roches éruptives et de silicates dosent en oxydes et en anhydrides. L'eau totale est évaluée séparément. Si au cours des opérations, la muscovite abandonnait son eau, il ne resterait plus dans le creuset d'autres de ses constituants que

V. O^{-2} = — 22	V. Si^{+4} = + 12
—————	V. Al^{+3} = + 9
— 22	V. K^{+1} = + 1
	—————
	+ 22

La muscovite complètement déshydratée serait ainsi représentée par la formule globale $Al_3 K Si_3 O_{11}$. Le radical $Si_3 O_{11}$ possède dix valences négatives, tout comme s'il dérivait de l'expression



Les analyses de muscovites naturelles montrent fort bien les proportions équivalentaires $O=22$, $Si=12$, $Al=9$ et $K=1$.

Bien entendu, il faut tenir compte des remplacements isomorphiques et, ce qui est plus grave, de la présence de titane.

On ne peut donc espérer obtenir des rapports équivalentaires absolument rigoureux de muscovites naturelles, tels que :

$$\frac{V. Si}{V. K} = 12, \quad \frac{V. Al}{V. K} = 9.$$

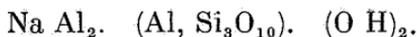
Mais néanmoins le motif de Bragg est excellent dans le cas examiné. Il vient confirmer, de toute sa puissance, l'exactitude *globale* de la formule des ancêtres.

*
**

Le motif de la muscovite étant $K Al_2 (Al Si_3 O_{10}) (O H)_2$, les X Raymen en ont déduit :

1° Que la phlogopite devait provenir du remplacement de Al_2^{+3} par Mg_3^{+2} . Le motif de la phlogopite est ainsi $K Mg_3 (Al Si_3 O_{10}) (O H)_2$.

2° Que le remplacement de K par Na donnait la paragonite



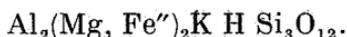
3° Que la biotite idéale avait pour motif



Or les analyses de biotites naturelles ne respectent pas les rapports élémentaires globaux donnés par ce motif :

$V. O^{-2} = - 24$ <hr style="width: 50%; margin: 0 auto;"/> $- 24$	<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 50%;">V. K^{+1}</td> <td style="width: 50%; text-align: right;">= + 1</td> </tr> <tr> <td>V. $(Mg + Fe)^{+2}$</td> <td style="text-align: right;">= + 6</td> </tr> <tr> <td>V. Al^{+3}</td> <td style="text-align: right;">= + 3</td> </tr> <tr> <td>V. Si^{+4}</td> <td style="text-align: right;">= + 12</td> </tr> <tr> <td>V. H^{+1}</td> <td style="text-align: right;">= + 2</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: right; border-top: 1px solid black;">+ 24</td> </tr> </table>	V. K^{+1}	= + 1	V. $(Mg + Fe)^{+2}$	= + 6	V. Al^{+3}	= + 3	V. Si^{+4}	= + 12	V. H^{+1}	= + 2		+ 24
V. K^{+1}	= + 1												
V. $(Mg + Fe)^{+2}$	= + 6												
V. Al^{+3}	= + 3												
V. Si^{+4}	= + 12												
V. H^{+1}	= + 2												
	+ 24												

L'ancienne formule était



Elle s'approchait plus souvent de la réalité, mais néanmoins n'était pas exacte.

Le motif et la formule appellent donc des modifications.

*
**

Si nous revenons à la notion équivalentaire, la muscovite et la paragonite sont caractérisées par
$$\frac{n \text{ Al}}{n \text{ K} + n \text{ Na}} = 9.$$

La phlogopite et la biotite sont au contraire caractérisées par
$$\frac{n \text{ Al}}{n \text{ K} + n \text{ Na}} = 3,$$
 quelles que soient les suppositions que nous puissions faire sur la position des atomes Al dans le motif ou même dans le cristal.

Les deux espèces *principales* de micas idéaux seraient ainsi : 1° les micas à 9 équivalents Al par équivalent (K + Na); 2° les micas à 3 équivalents Al par équivalent (K + Na).

Les premiers sont idéalement caractérisés par $m \text{ Mg} + n \text{ Fe}'' = 0$, les seconds par un rapport équivalentaire :

$$\frac{n \text{ Mg} + n \text{ Fe}''}{n \text{ Na} + n \text{ K}} = 6.$$

Il n'est donc pas interdit de supposer que les biotites naturelles les plus pures sont des associations de micas à 3 et à 9 équivalents aluminium par équivalent $n \text{ K} + n \text{ Na}$.

De la sorte, l'étude des analyses revient à un problème de mélange. Le calcul équivalentaire permet de déterminer les équivalents $n \text{ Na} + n \text{ K}$ qui reviennent à chacun des micas idéaux. Nous verrons tantôt comment.

La notion équivalentaire est ainsi probablement capable de résoudre le problème des micas. Les rayons X à eux seuls n'avaient pu apporter jusqu'à présent que des solutions particulières relatives à des minéraux idéaux ou spécialement choisis pour leur pureté.

En 1937, W. L. Bragg avouait, avec sa franchise habituelle, que seule la structure de la muscovite avait été étudiée en détail. Si rien de bien sensationnel ne s'est passé depuis la date indiquée, les motifs proposés pour les autres micas par les X Raymen résultent de spéculations humaines et non point d'expériences directes contrôlées par des analyses chimiques.

Suivant Warren, le motif de la trémolite est :



L'ancienne formule était $\text{Ca Mg}_3(\text{Si O}_3)_4$.

Le désaccord est évident. Warren nous donne l'analyse chimique du minéral examiné qui provient de Ham Island (Alaska) :

	Mgr	Poids moléculaires	Millimoles	Coefficient de valence
Si O ₂	= 58.590	60	976,5	4
Al ₂ O ₃	= 100	102	1,0	6
Mg O	= 24.780	40	619,5	2
Na ₂ O	= 120	62	1,9	2
Ca O	= 13.950	56	249,1	2
K ₂ O	= 100	94	1,0	2
H ₂ O	= 2.310	18	128,3	2
	<hr/> 99.950			

Dans une mole Si O₂, il y a 4 équivalents Si⁺⁴ et 4 équivalents O⁻². Dans 976,5 moles Si O₂, il y a donc 976,5 × 4 équivalents Si⁺⁴. Dans une mole Al₂O₃, se trouvent 6 équivalents Al⁺³ et 6 équivalents O⁻².

Dans une mole Mg O, 2 équivalents Mg⁺² balancent 2 équivalents O⁻², et ainsi de suite.

Dans les 99.950 mg de minéral examiné nous trouvons donc les nombres de milléquivalents suivants :

n O = — 3.906	n Si = + 3.906
n O = — 6	n Al = + 6
n O = — 1.239	n Mg = + 1.239
n O = — 4	n Na = + 4
n O = — 498	n Ca = + 498
n O = — 2	n K = + 2
n O = — 256	n H = + 256
<hr/> — 5.911	<hr/> + 5.911

Or l'analyse élémentaire globale du motif est :

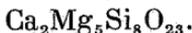
V. O = — 48	V. Ca = + 4
<hr/> — 48	V. Mg = + 10
	V. Si = + 32
	V. H = + 2
	<hr/> + 48

Si nous multiplions les chiffres de l'analyse élémentaire globale par 123,2, qui est le rapport du chiffre équivalentaire de l'analyse en milliéquivalents, soit 5.911, au chiffre 48, nous trouvons :

n O = — 5.913	n Si = + 3.942
— 5.913	n Mg = + 1.232
	n Ca = + 493
	n H = + 246
	+ 5.913

En dépit de petites quantités d'aluminium, de sodium et de potassium, les rapports équivalentaires sont respectés.

Nous devons donc sans hésitation adopter le motif de Warren et abandonner la formule ancienne. Par déshydratation, nous obtiendrons :



Le radical Si_8O_{23} des amphiboles déshydratées balance 14 valences électro-positives, tout comme s'il dérivait de la formule :

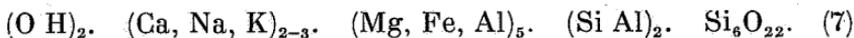


*
**

Le motif de la trémolite étant découvert, on comprend aisément que les X Raymen aient tenu à modifier toutes les formules anciennes des amphiboles. C'est ainsi, par exemple, que le motif adopté pour la riebeckite était en 1937 :



Celui proposé pour la hornblende est un assez long :



Il rebutera certes le pétrographe impatient de retourner à son microscope. Mais il a un autre défaut encore beaucoup plus grave : il n'est, à ma connaissance, applicable à aucune hornblende naturelle. Les analyses chimiques transcrites en équivalents élémentaires ne correspondent nullement au motif. Elles indiquent au contraire un silicate très basique au sens minéralogique du terme. Les équivalents H des hornblendes

(6) Ce motif est d'ailleurs faux. Pour équilibrer les valences, il faudrait écrire $(\text{OH})_2 \text{Na}_2 \text{Fe}''_3 \text{Fe}'''_2 \text{Si}_8 \text{O}_{22}$.

(7) Le balancement de ce motif est très discutable.

naturelles sont, d'autre part, trop peu nombreux pour composer les $(\text{O H})_2$ du motif. Ce dernier ne peut donc être adopté.

D'autre part, les anciennes formules faisaient de la hornblende un métasilicate anhydre beaucoup plus acide que le minéral.

Dans ce cas, formule et motif doivent donc être tous deux rejetés. Nous arrivons par cette voie indirecte à une conclusion assez inattendue : la hornblende ne semble pas être chimiquement une amphibole ⁽⁸⁾.

C'est donc avec beaucoup d'à-propos que M. de Béhune a adopté dans ses intéressants calculs une analyse type de Tröger, beaucoup plus voisine de la réalité.

*
**

Ces exemples montrent avec quelle prudence il convient de choisir entre les motifs et les anciennes formules. D'une façon presque générale, les premiers ont confirmé l'exactitude globale des secondes.

Mais il subsiste encore certaines hésitations, surtout en ce qui concerne les silicates hydrogénés, oxhydrogénés ou hydratés. Les opinions se stabiliseront lorsque tout examen par les rayons X sera appuyé par une analyse chimique suffisamment exacte et complète pour qu'elle puisse être traduite en milliéquivalents.

Demain donc, minéralogistes et chimistes se tendront enfin une main fraternelle et termineront une assez vilaine querelle commencée dès les premières découvertes de Haüy.

*
**

Nous allons examiner l'analyse très compliquée d'une roche pauvre en silice. Elle est signée par Hillebrand, ce qui suffit à nous donner les apaisements les plus complets. Clarke ⁽⁹⁾ désigne la roche sous le nom de « Mica péridotite ». La description de J. S. Diller est la suivante : biotite, serpentine, perovskite; en quantité moins importante : apatite, muscovite, magnétite, calcite, chlorite et autres produits secondaires.

L'analyse de Hillebrand ne comprend pas moins de 17 déterminations. La roche est visiblement altérée. Nous avons donc

⁽⁸⁾ Suivant Tschermak, la hornblende contiendrait un composé très basique au sens minéralogique, dont la formule serait $R' \text{Al}_2 \text{Si O}_6$. Le radical Si O_6 est octavalent. Son équivalent est 15,5, donc beaucoup plus faible encore que celui du radical de l'olivine (23).

⁽⁹⁾ *The data of geochemistry*, p. 460, analyse D.

choisi un exemple particulièrement compliqué. Il nous écarte des analyses habituelles de roches fraîches, faites au moyen de 9 à 11 déterminations seulement.

Les normes américaines sont, d'après Clarke :

Anorthite (an)	8,6	F	8,6
Néphéline (ne)	1,4		
Leucite (Lc)	9,4	L	10,8
Olivine (ol)	37,6		
Akermanite (am)	8,5	O	46,1
Magnétite (mt)	6,0		
Hématite (hm)	2,9	H	8,9
Ilménite (il)	7,1	T	7,1
Apatite (ap)	1,9	A	1,9
Eau	7,5		

98,6

Les normes donnent ainsi de la roche un portrait sans aucune ressemblance.

Afin d'obtenir des résultats plus voisins de la réalité, nous allons traduire en milliéquivalents l'analyse de Hillebrand. Le tableau I nous donne, évaluées en milligrammes, les déterminations du chimiste. Nous commençons notre transcription de la manière habituelle et déterminons le nombre de millimoles. Ces nombres sont, suivant les valences, multipliés par 1, 2, 4, 6, ou 10, afin de déterminer le nombre des milliéquivalents.

TABLEAU I.
Péridotite de Crittenden County, Kentucky.

	Mgr	p.m.	m.m.	Coef.	Milliéquivalents
Si O ₂ ...	33.840	60	564,0	4 n Si ⁺⁴	= 2.246 = n O ⁻⁻
Al ₂ O ₃ ...	5.880	102	57,6	6 n Al ⁺³	= 346 = n O ⁻⁻
Fe ₂ O ₃ ...	7.040	160	44,0	6 n Fe ⁺³	= 264 = n O ⁻⁻
Fe O ...	5.160	72	71,7	2 n Fe ⁺²	= 143 = n O ⁻⁻
Mg O ...	22.960	40	574,0	2 n Mg ⁺²	= 1.148 = n O ⁻⁻
Ca O ...	9.460	56	168,9	2 n Ca ⁺²	= 338 = n O ⁻⁻
Na ₂ O ...	330	62	5,3	2 n Na ⁺¹	= 11 = n O ⁻⁻
K ₂ O	2.040	94	21,7	2 n K ⁺¹	= 43 = n O ⁻⁻
H ₂ O	7.500	18	416,7	2 n H ⁺¹	= 833 = n O ⁻⁻
Ti O ₂ ...	3.780	80	47,3	4 n Ti ⁺⁴	= 189 = n O ⁻⁻
C O ₂ ...	430	44	9,8	4 n C ⁺⁴	= 39 = n O ⁻⁻
P ₂ O ₅ ...	890	142	6,3	10 n P ⁺⁵	= 63 = n O ⁻⁻

p.m. = poids moléculaires. — m.m. = nombre de millimoles.
Coef. = coefficient de valence.

	Mgr	p.m.	m.m.	Coef.		Milliéquivalents
Cl	50	35,5	1,4	1	n Cl ⁻¹ =	= I-
Cr ₂ O ₃ ...	180	152	1,1	6	n Cr ⁺³ =	7 = n O--
Mn O ...	160	71	2,3	2	n Mn ⁺² =	5 = n O--
Ni O	100	71	1,3	2	n Ni ⁺² =	3 = n O--
Ba O ...	60	153	0,4	2	n Ba ⁺² =	1 = n O--
	<hr/>					
	99.860					+ 5.679 — 5.680
Oxygène correspondant au chlore .						+ 1
						<hr/>
						+ 5.679 — 5.679

L'analyse équivalentaire globale en milliéquivalents est :

n O ⁻² = — 5.678	n H ⁺¹ = + 833	n Fe ⁺³ = + 264
n Cl = — 1	n K ⁺¹ = + 43	n Al ⁺³ = + 346
<hr/>	n Na ⁺¹ = + 11	n Cr ⁺³ = + 7
— 5.679	n Ca ⁺² = + 338	n C ⁺⁴ = + 39
	n Ba ⁺² = + 1	n Si ⁺⁴ = + 2.246
	n Mg ⁺² = + 1.148	n Ti ⁺⁴ = + 189
	n Fe ⁺² = + 143	n P ⁺⁵ = + 63
	n Mn ⁺² = + 5	<hr/>
	n Ni ⁺² = + 3	+ 3.154
	<hr/>	
	+ 2.525	
	<hr/>	
		+ 5.679

Ainsi donc environ 100.000 mgr de péridotite examinée contiennent 5.679 milliéquivalents électro-positifs vis-à-vis de l'oxygène et du chlore. Ils sont presque exactement balancés par les mq oxygène. Ce balancement est une des caractéristiques des roches éruptives. Parmi les 11.358 milliéquivalents que contiennent 100.000 mgr de roche, il y en a 5.679 électro-positifs vis-à-vis de l'oxygène et du chlore. Ils sont par définition tous chimiquement équivalents. Mais ils possèdent des fonctions chimiques différentes. L'analyse équivalentaire globale, malgré son exactitude, est donc assez inexpressive.

*
**

Pour représenter plus exactement les solutions solides de la roche, il conviendrait de grouper les équivalents de façon à mettre en opposition des anions et des cations.

Nous pouvons placer du côté des cations l'hydrogène et les métaux mono- et bivalents pour un total de 2.525 mq.

Nous pouvons combiner le phosphore et le carbone à des oxygènes pour former les anions $P O_4^{-3}$ et $C O_3^{-2}$.

Le silicium entrera dans des tétraèdres $(Si O_4)^{-4}$.

Ceux-ci, par juxtaposition, donneront toute la série des radicaux acides des silicates.

Il nous restera alors à placer le fer ferrique, l'aluminium, le chrome et le titane. Les trois premiers sont en somme des métaux acidifiables, tout aussi disposés à entrer dans un radical acide qu'à fonctionner dans d'autres cas comme cations. Quant au titane, il semble conserver la valence + 4 dans toutes les roches. Il est cation dans la titanite ou sphène $Ti Ca Si O_5$. Mais il se trouve aussi dans le radical $(Ti O_3)^{-2}$ de l'ilménite $Fe''Ti O_3$.

Le placement de l'aluminium, du chrome, du fer ferrique et du titane dépendra donc de la description pétrographique de la roche.

*
**

Dans la péridotite examinée, le titane doit se trouver principalement dans la perovskite ou métatitanate de calcium $(Ca Ti O_3)$, dont Diller signale la présence parmi les constituants principaux de la roche. Une mole $Ti O_2$ et une mole $Ca O$ composent une mole de perovskite contenant elle-même deux équivalents Ca balancés par deux équivalents $Ti O_3^{-2}$.

Nous obtiendrons donc $n Ti O_3$ en multipliant par 2 le nombre de millimoles $Ti O_2$.

La quantité de perovskite contenue dans la roche sera ainsi donnée par :

$$\begin{array}{ll} n Ti O_3 = 47,3 \times 2 & n Ca = 47,3 \times 2 \text{ ou} \\ n Ti O_3 = 95 & n Ca = 95 \end{array}$$

L'équivalent $Ti O_3$ vaut 48 et l'équivalent Ca vaut 20. Le poids de perovskite est donc

$$(48 + 20) \times 95 \text{ ou de } 6.460 \text{ mgr.}$$

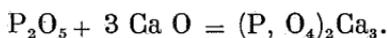
*
**

Le poids de calcite se déterminera en posant :

$$\begin{array}{ll} n \text{ C O}_3 = 9,8 \times 2 & n \text{ Ca} = 9,8 \times 2 \text{ ou} \\ n \text{ C O}_3 = 20 & n \text{ Ca} = 20 \end{array}$$

D'où $\text{Ca CO}_3 = 1.000$ mgr.

Une mole P_2O_5 donne 6 équivalents P O_4^{-3} ,
puisque



L'apatite de la roche est dès lors exprimée par :

$$\begin{array}{ll} n \text{ P O}_4 = 6 \times 6,3 & n \text{ Ca} = 6 \times 6,3 \text{ ou} \\ n \text{ P O}_4 = 38 & n \text{ Ca} = 38 \end{array}$$

Son poids calculé est 1.963 mgr.

La chromite n'est pas signalée dans la description. Nous nous débarrasserons néanmoins de chrome en posant :

$$n \text{ Cr}_2\text{O}_4 = 2, \quad n \text{ Fe}'' = 2.$$

Le poids de chromite est ainsi 224 mgr.

*
**

Le fer ferrique pourrait remplacer des équivalents Al dans les micas. Il pourrait à première vue jouer le rôle de cation dans l'acmite ou aegyrine. La formule de ce pyroxène sodique ne paraît pas discutée par Bragg. Elle est $\text{Na Fe}'''(\text{Si O}_3)_2$. Le fer ferrique pourrait aussi se trouver dans une amphibole ferrisodique : la riebeckite. Mais Diller nous indique la présence de magnétite. Or les roches franchement magnétifères ne contiennent guère de pyroxènes ou d'amphiboles ferrisodiques. Dès lors le fer ferrique doit être calculé en magnétite, Fe_3O_4 , qui est en somme un sel ferreux du radical bivalent $\text{Fe}_2'''\text{O}_4$. La formule de la magnétite serait ainsi $\text{Fe}'' \cdot \text{Fe}_2'''\text{O}_4$, tout comme celle de l'hercinite, aluminat ferreux, est $\text{Fe}'' \cdot \text{Al}_2'''\text{O}_4$.

La magnétite de la roche pourra dès lors être représentée par :

$$\begin{array}{ll} n \text{ Fe}_2 \text{ O}_4 = - 88 & n \text{ Fe}'' = + 80 \\ \hline - 88 & n \text{ Mn}'' = + 5 \\ & n \text{ Ni}'' = + 3 \\ & \hline & + 88 \end{array}$$

Le poids ainsi trouvé est 10.209 mgr.

Il est à remarquer que nous pourrions préciser la quantité de fer ferrique des micas en faisant un dosage spécial de la partie aimantable de la roche ou de celle qui dépose dans la liqueur de Retgers.

*
**

Résumons le résultat de nos premiers calculs :

		Poids
Magnétite (mt).	n Fe ₂ O ₄ = - 88	n Fe'' = + 80
		n Mn = + 5
		n Ni'' = + 3
		10.209 mgr
Chromite (cm).	n Cr ₂ O ₄ = - 2	n Fe'' = + 2
		224 mgr
Perovskite (p.f.)	n Ti O ₃ = - 95	n Ca = + 95
		6.460 mgr
Apatite (ap) ...	n P O ₄ = - 38	n Ca = + 38
		1.963 mgr
Calcite (cc)	n C O ₃ = - 20	n Ca = + 20
		1.000 mgr
	- 243	+ 243
		19.856 mgr

La partie de la roche que nous n'avons pas encore examinée contient par différence :

n Cl = - 1	n Al''' = + 346
n A Si = - 1.794	n Ca = + 185
- 1.795	n Ba = + 1
	n Mg = + 1.148
	n Na = + 11
	n K = + 43
	n Fe'' = + 61
	+ 1.795

La notation n A Si = 1.794 signifie que le nombre de milliéquivalents des divers radicaux acides dérivés du tétraèdre (Si O₄)⁻⁴ est égal à 1.794. Parmi les métaux, l'aluminium reste seul acidifiable.

Pour compléter l'analyse, nous ajouterons l'eau en écrivant :

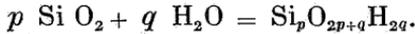
$$n (\text{O H}) = 417, \quad n \text{ H} = 417.$$

Nous avons vu déjà que dans le motif de la muscovite, Al est à la fois cation et compris dans le radical (Al Si₃O₁₀)⁻⁵. Si nous employons la notation de Bragg, Al figurerait des deux côtés de notre tableau, ce qui compliquerait sans utilité nos calculs. Il est donc beaucoup plus simple, *lorsque la présence de spi-*

nelles ou de véritables aluminates n'est pas signalée, de considérer Al^{+3} comme un métal non acidifiable. Peu nous importe au fond que le motif de l'orthose idéale soit $\text{K}^{+1}(\text{Al Si}_3\text{O}_8)^{-1}$, alors que la vieille formule $\text{K}^{+1}\text{Al}^{+3}(\text{Si}_3\text{O}_8)^{-4}$ nous permettra de calculer un poids de feldspath exactement égal à celui exprimé par le motif.

*
**

Mnémotechniquement, tous les radicaux électro-négatifs de la silice dérivent de l'expression



La valence du radical $\text{Si}_p\text{O}_{2p+q}$ est égale à $-2q$.

Nous avons vu au début de ce travail que le radical de la muscovite *déshydratée* est $(\text{Si}_3\text{O}_{11})^{-10}$ et celui des amphiboles *déshydratées* : $(\text{Si}_8\text{O}_{23})^{-14}$.

Le tableau II nous donne les formules des radicaux silicatés utilisés dans les calculs, leurs valences, leurs poids moléculaires, la valeur E de leurs équivalents, la quantité $\text{Si O}_2\text{E}$ de silice Si O_2 par équivalent.

TABLEAU II.

Radicaux	V	PM	E	$\text{Si O}_2\text{E}$	Minéraux caractéristiques
Si_3O_8	4	212	52,00	45,00	Orthose
Si_8O_{23}	14	592	42,29	34,29	Trémolite-aq
Si_3O_3	2	76	38,00	30,00	Diopside
$\text{Si}_3\text{O}_3^{10}$	8	244	30,50	22,50	Akermanite
Si_2O_7	6	168	28,00	20,00	Serpentine-aq
Si_3O_{11}	10	260	26,00	18,00	Muscovite-aq
Si_2O_4	4	92	23,00	15,00	Olivine
Si_2O_5	6	106	18,00	10,00	Titanite
Si_2O_{11}	14	232	16,57	8,57	Margarite-aq

On remarque qu'on peut écrire

$$E = \text{Si O}_2\text{E} + 8.$$

Si nous divisons donc le poids de silice contenu dans la roche, soit 33.840 mgr, par le nombre des équivalents A Si des silicates, soit par 1.794, nous trouvons 18,81. Il y a donc en moyenne 18,81 mgr de silice dans chaque équivalent acide de la silice. *L'équivalent silicique moyen Em* vaut dès lors :

$$\text{Em} = 18,81 + 8 = 26,81.$$

Nous voyons dans le tableau II que Em se place entre le radical Si_2O_7 de la serpentine-aq et le radical Si_3O_{11} de la muscovite-aq.

*
**

Le seul milliéquivalent chlore peut assez vraisemblablement être attribué à la sodalite : $\text{Na}_4\text{Al}_3\text{Cl}(\text{Si O}_4)_3$.

Nous aurons ainsi :

Sodalite.

$$\begin{array}{rcl} n \text{ Cl} & = & 1 \\ n \text{ Si O}_4 & = & 12 \end{array} \qquad \begin{array}{rcl} n \text{ Na} & = & 4 \\ n \text{ Al} & = & 9 \end{array}$$

Poids 485 mgr.

Diller ne nous signale ni feldspaths, ni leucite, ni nephéline, ni hornblende, ni augite. Nous admettrons par le fait qu'après distribution de $n \text{ Al} = 9$ à la sodalite, il reste $n \text{ Al} = 346 - 9$, soit 337 milliéquivalents Al, à attribuer à la muscovite et à la biotite. Il restera aussi, puisque $n \text{ Na} = 4$, dans la sodalite

$$n \text{ Na} + n \text{ K} - 4 = 11 + 43 - 4 = 50,$$

ou 50 milliéquivalents alcalins attribuables au mica.

Si ces 50 équivalents $\text{Na} + \text{K}$ étaient tous attribuables à des micas à 9 équivalents Al par équivalent $\text{Na} + \text{K}$, soit à la muscovite ou à la paragonite, ils exigeraient, d'après le motif de Bragg ou l'ancienne formule, $n \text{ Al} = 9 \times 50 = 450$.

Or il ne nous reste plus que $n \text{ Al} = 337$.

$$\text{Excès} = 113.$$

Chaque fois que nous remplaçons un équivalent $\text{Na} + \text{K}$ d'un mica à 9 Al par un équivalent $\text{Na} + \text{K}$ d'un mica à 3 Al, nous perdons 6 équivalents Al. Le rapport $113 : 6 = 18,8$ nous indique donc le nombre de milliéquivalents $n \text{ Na} + n \text{ K}$ à attribuer aux micas à 3 Al. Nous arrondissons à 19. Les milliéquivalents alcalins des micas à 9 Al sont donc au nombre de $50 - 19 = 31$. D'où :

Muscovite, paragonite.

$$\begin{array}{rcl} n \text{ Si}_3\text{O}_{11} & = & 310 \\ n \text{ O H} & = & 31 \\ \hline & - & 341 \\ & & \hline & & n \text{ K} = 24 \\ & & n \text{ Na} = 7 \\ & & n \text{ Al} = 279 \\ & & n \text{ H} = 31 \\ & & \hline & & + 341 \end{array} \left. \begin{array}{l} \\ \\ \\ \\ \end{array} \right\} 31 \begin{array}{l} \\ \\ (7 + 24) \times 9 \\ (7 + 24) \end{array}$$

Poids calculé : 12.226 mgr.

Phlogopite.

$\begin{array}{r} n \text{ Si}_3\text{O}_{11} = 190 \\ n \text{ O H} = 19 \\ \hline - 209 \end{array}$	$\begin{array}{r} n \text{ K} = 19 \\ n \text{ Mg} = 114 \quad (19 \times 6) \\ n \text{ Al} = 57 \quad (19 \times 3) \\ n \text{ H} = 19 \\ \hline + 209 \end{array}$
--	--

Poids calculé : 7.904 mgr.

Nous n'avons pas introduit d'équivalents Fe'', car nous n'avons aucune base d'appréciation. C'est pourquoi dans le cas présent nous dosons en phlogopite au lieu d'évaluer en biotite. La différence pondérale ne peut excéder

$$n \text{ Mg} (28 - 12),$$

dans laquelle 28 et 12 sont respectivement les équivalents Fe'' et Mg''. Dans le cas présent on trouve :

$$n \text{ Mg} (18 - 12) = 114 \times 16 = 1.824 \text{ mgr.}$$

Mais comme dans l'analyse examinée on n'a plus à disposer que de $n \text{ F}'' = 61$, l'erreur maxima se réduira à :

$$61 \times 16 = 976 \text{ mgr.}$$

Logiquement, on devrait la répartir par parties égales entre la phlogopite, qui deviendrait ainsi une véritable biotite, et l'olivine.

L'infime quantité de baryum et tout le calcium restant sont attribués à l'akermanite. On trouve :

$\begin{array}{r} n \text{ Si}_3\text{O}_{10} = 186 \\ \hline - 186 \end{array}$	$\begin{array}{r} n \text{ Ca} = 185 \\ n \text{ Ba} = 1 \\ \hline + 186 \end{array}$
--	---

Poids d'akermanite : 9.442 mgr.

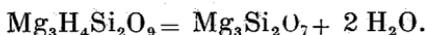
Il nous reste à séparer par le calcul la serpentine qui nous est signalée par Diller, de l'olivine qui doit se trouver dans la roche.

Suivant Warren et Bragg, le motif de la serpentine serait $Mg_6 \cdot (OH)_6 \cdot Si_4O_{11} \cdot H_2O$. La formule ancienne était $3 Mg O \cdot 2 Si O_2 \cdot 2 H_2O$ ou globalement $Mg_3H_4Si_2O_9$.

On s'aperçoit que Bragg et Warren ont doublé la formule pour pouvoir indiquer le radical Si_4O_{11} , s'approchant de celui des amphiboles. Globalement, néanmoins, motif et formule doublée sont identiques :

V. $O^{-2} = 36$	V. $H^{+1} = 8$
— 36	V. $Mg^{+2} = 12$
	V. $Si^{+4} = 16$
	+ 36

La déshydratation complète de la serpentine est exprimée par :



Le radical de la serpentine $- 2 H_2O$ est ainsi $(Si_2O_7)^{-6}$, comme s'il provenait de $2 Si O_2 + 3 H_2O = Si_2O_7H_6$.

On peut donc écrire pour la serpentine, y compris H_2O ,

V. $Si_2O_7 = 6$	V. $Mg = 6$
V. $O H = 2$	V. $H = 2$
— 8	+ 8

Quant à l'olivine, sa formule est fort simple : $(Mg, Fe'')_2Si O_4$. Son motif est identique :

$$V. Si O_4 = 4, \quad V. (Mg + Fe) = 4.$$

*
**

Faisons, grâce aux chiffres du tableau II, le décompte de la silice employée. Nous trouvons :

Sodalite n $Si O_4 = 12$	12	×	15	=	180 mgr
Micas n $Si_3O_{11} = 310 + 190$. .	500	×	18	=	9.000 mgr
Akermanite n $Si_3O_{10} = 186$. .	186	×	22,5	=	4.185 mgr
					13.365 mgr
Reste pour la serpentine et l'olivine					20.475 mgr
Total de l'analyse d'Hillebrand					33.840 mgr

Il reste par différence les milliéquivalents suivants :

n Al'''	1
n Fe''	61
n Mg''	1.034
		1.096

Si nous attribuons des 1.096 mq à la serpentine, nous employons

$$1.096 \times 20 = 21.920 \text{ mgr Si O}_2.$$

Il n'en reste que :

$$20.475 \text{ mgr}$$

$$\hline 1.445 \text{ mgr.}$$

Mais chaque fois que nous remplaçons un mq Si_2O_7 de la serpentine par un équivalent Si O_4 de l'olivine qui ne contient que 15 mgr Si O_2 , nous gagnons 5 mgr Si O_2 . Le nombre de milliéquivalents Si O_4 de l'olivine est donc $1.445 : 5 = 289$.

Il reste pour la serpentine un nombre de milliéquivalents Si_2O_7 , donné par $1.096 - 289 = 807$.

*
**

Nous posons dès lors :

Olivine.

$$n \text{ Si O}_4 = 289$$

$$\hline - 289$$

$$n \text{ Fe}'' = 61$$

$$n \text{ Mg} = 228$$

$$\hline + 289$$

Poids de l'olivine : 11.091 mgr.

La serpentine est représentée par :

Serpentine.

$$n \text{ Si}_2\text{O}_7 = 807$$

$$n \text{ O H} = 269$$

$$\hline - 1.076$$

$$n \text{ Al} = 1 \text{ (reste)}$$

$$n \text{ Mg} = 806 \text{ (reste)}$$

$$n \text{ H}'' = 269 \text{ (806 + 1) : 3}$$

$$\hline + 1.076$$

Poids de la serpentine : 37.119 mgr.

*
**

L'eau utilisée peut être représentée par :

Micas à 9 Al	n O H = n H	31
Micas à 3 Al	n O H = n H	19
Serpentine	n O H = n H	269
		<hr/>
		319
	Reste. . .	98
		<hr/>
		417

Le reste représente $98 \times 18 = 1.764$ mgr H_2O , probablement évaporable à 100° .

*
**

Le résultat pondéral des calculs peut se résumer :

	Mgr
Feldspaths, leucite, nephéline	0
Sodalite	485
Muscovite, paragonite	12.226
Phlogopite	7.904
Akermanite	9.442
Olivine	11.091
Serpentine	37.119
Magnétite	10.209
Chromite	224
Perovskite	6.460
Calcite	1.000
Apatite	1.963
Eau	1.764
	<hr/>
	99.887
Analyse de Hillebrand...	99.860
	<hr/>
Différence...	27

La différence est imputable au fait que nous avons arrondi au nombre entier toutes les évaluations équivalentaires. Le poids de phlogopite est un peu inférieur à celui de la biotite renseignée dans la roche. Par contre, celui de l'olivine doit être un peu trop élevé, les différences se compensant exactement et le poids total des barylites restant constant dans les diverses hypothèses.

La comparaison de ces résultats pondéraux avec la description de Diller et avec les normes indiquées dans le travail de

TABLEAU III.

Mica-péridotite de Crittenden County.

Ensemble des résultats.

	Milli-équivalents —	Milli-équivalents +	Mgr	
Sodalite	n Cl = 1	n Na = 4	485	<i>Coupholites :</i> Milliéquivalents : 354 × 2 Poids : 12.711 mgr
Muscovite	n Si O ₄ = 12	n Al = 9		
Paragonite ..	n Si ₃ O ₁₁ = 310	n K = 24		
	n O H = 31	n Na = 7	12.226	
		n Al = 279		
		n H = 31		
Phlogopite ..	n Si ₃ O ₁₁ = 190	n K = 19	7.904	<i>Barylites :</i> Milliéquivalents : 2.003 × 2 Poids : 85.412 mgr
	n O H = 19	n Mg = 114		
		n Al = 57		
		n H = 19	9.442	
Akermanite .	n Si ₃ O ₁₀ = 186	n Ca = 185	11.091	
Olivine	n Si O ₄ = 289	n Ba = 1	37.119	
		n Fe'' = 61		
		n Mg = 228		
Serpentine ...	n Si ₂ O ₇ = 807	n Al = 1		
	n O H = 269	n Mg = 806		
		N H = 269		
Magnétite	n Fe ₂ O ₄ = 88	n Fe'' = 80	10.209	
		n Mn = 5	224	
		n Ni = 3	6,460	
Chromite	n Cr ₂ O ₄ = 2	n Fe'' = 2	1.963	
Perovskite ...	n Ti O ₃ = 95	n Ca = 95	1.000	
Apatite	n P O ₄ = 38	n Ca = 38		
Calcite	n C O ₃ = 20	n Ca = 20		
Eau	n O H = 98	n H = 98	1.764	Poids: 1.764 mgr

Nombres
équivalentaires -2.455 +2.455 99.887

Nombres
équivalentaires-aq ... -2.038 +2.038 92.387

Clarke est assez édifiante par elle-même pour que nous n'insistions pas.

L'introduction de silicates modaux hydrogénés, oxhydrilés ou simplement hydratés nous a permis de mettre en certaine évidence le caractère de la roche examinée. Ce n'est pas en somme une véritable péridotite, mais une ruine calcitée et serpentinisée. C'est ce caractère ruiniforme, joint à la complication de l'analyse d'Hillebrand, qui nous a entraîné dans d'aussi longs calculs.

Mais que les pétrographes se rassurent ! Lorsqu'il s'agit de roches fraîches, les calculs modaux s'effectuent rapidement. C'est ce que j'espère prouver d'ici peu. Une longue et fastidieuse explication de la méthode suivie, appuyée par un exemple numérique particulièrement ingrat, était auparavant indispensable pour prouver l'efficacité relative du procédé, dans un cas presque désespéré.

La vie et l'œuvre scientifique de Lucien Cayeux (1864-1944),

par MAURICE LERICHE.

Tardivement, par une voie détournée, nous parvenait à Bruxelles, au début de l'année 1945, la nouvelle de la mort de Lucien Cayeux. Ce fut une douloureuse surprise. Elle trouva incrédules ceux qui le connaissaient bien, tant étaient restées grandes sa résistance physique, sa vigueur d'esprit, son inlassable activité.

Lucien Cayeux s'est éteint subitement, sans nulle souffrance apparente, le 1^{er} novembre 1944, à Mauves-sur-Loire, près de Nantes. Il était né, le 26 mars 1864, à Semousies, petit village de l'Avesnois, de cette région du Nord de la France où les terrains primaires de la vieille et dure Ardenne plongent, pour disparaître bientôt, sous la bordure crétacée du bassin de Paris. Comme en Ardenne, l'hiver y est rude et long; le pays est humide; les bruines y sont fréquentes; mais au printemps règne dans l'Avesnois une relative sécheresse : c'est l'époque où les vergers en fleurs font au pays d'Avesnes une ravissante parure.

La jeunesse de Lucien Cayeux s'écoula dans cette région, où roches et fossiles s'offrent aux chercheurs dans de nombreuses carrières. Il connut là un collectionneur zélé, D. Piérart, qui battait le pays à la recherche des fossiles. Piérart lui communiqua le goût de la géologie et l'engagea à poursuivre ses études à Lille, auprès de Jules Gosselet. Après un court passage dans l'enseignement primaire ⁽¹⁾, Cayeux y vint préparer sa licence, et, en 1887, il était attaché, en qualité de préparateur, au laboratoire de géologie de la Faculté des Sciences.

Si l'on compare les fonctions du préparateur d'alors à celles de l'assistant d'aujourd'hui, on peut trouver que J. Gosselet fut un chef exigeant.

Un unique préparateur secondait, au laboratoire de Lille, les deux professeurs de géologie. Il devait réunir les roches et les fossiles — dont la liste était toujours fort longue — qui, après avoir été présentés aux cours, allaient alimenter les travaux pratiques. Il était chargé, en outre, sous la direction du professeur titulaire, de l'administration du laboratoire et du classement des collections. Et comme le laboratoire de géologie était aussi, à Lille, le siège de la Société géologique du Nord, le préparateur, sans être, le plus souvent, ni le bibliothécaire ni le secrétaire attitré de la Société, devait assurer à peu près complètement ces deux fonctions. Le préparateur devait enfin se livrer à des recherches personnelles : c'était une condition primordiale, dont dépendait surtout l'attribution du poste.

En principe, le préparateur devait consacrer un temps égal au service professionnel et à la recherche. Mais lorsque, entraîné par l'enthousiasme communicatif du maître, le préparateur avait quelque tendance à faire une part plus grande à la recherche, ce n'est pas sans une certaine rudesse qu'il s'entendait rappeler que « le service doit passer avant tout ». A cette école se prenait le goût de la recherche et se fortifiait aussi le sens du devoir. Le contact journalier du maître et de l'élève faisait naître, chez l'élève, une vénération profonde pour le maître, que l'on sentait être juste et bon. Une chaude affection entourait l'élève. Je crois que Lucien Cayeux fut l'élève préféré et qu'il dut cette préférence au fait qu'il s'engagea résolument, avec un succès croissant, dans la voie que Gosselet lui avait indiquée.

(1) Une plaque commémorative a été récemment apposée, à Avesnes-sur-Helpe, sur l'école où enseigna Lucien Cayeux.

C'est dans le sombre et triste laboratoire de géologie de l'ancienne Faculté des Sciences, disparue avec la rue des Fleurs, près du laboratoire où avait travaillé Pasteur, que Cayeux vécut ses années de pur enthousiasme et connut les premières joies de la recherche.

En 1891, au cours de la Réunion extraordinaire de la Société géologique de France, en Provence, Marcel Bertrand offrit à L. Cayeux le poste de préparateur de géologie à l'Ecole des Mines, à Paris. Cayeux hésita beaucoup devant les avis divergents de ses maîtres lillois : de J. Gosselet, qui, laissant entrevoir une retraite prochaine, lui conseillait de rester; de Ch. Barrois, qui, faisant valoir les immenses ressources de la capitale, l'engageait à partir. Cayeux se félicita toujours d'avoir suivi ce dernier conseil.

A ses nouvelles fonctions de préparateur à l'Ecole des Mines s'ajoutèrent bientôt celles de préparateur à l'Ecole des Ponts-et-Chaussées. A l'Ecole des Mines, il acheva sa thèse de doctorat, qu'il vint soutenir à Lille en 1897.

Quelques années plus tard — en 1902 — il devenait chef des travaux de géologie à l'Ecole des Mines. Entre-temps, il avait été nommé, à l'Institut national agronomique, répétiteur du cours de géologie (1898), puis chargé de cours de géologie et de minéralogie (1901), et enfin, la même année, professeur de géologie appliquée à l'agriculture. Il inaugura là un enseignement nouveau, qui eut un grand succès.

Lorsque, en 1904, pour des raisons de santé, Marcel Bertrand dut abandonner sa chaire à l'Ecole des Mines, L. Cayeux fut désigné pour le remplacer, en qualité de professeur suppléant de géologie générale. A la mort de Marcel Bertrand, survenue en 1907, il devint professeur titulaire, à l'encontre d'une tradition presque toujours respectée. Il quitta l'Ecole des Mines en 1912, pour occuper, au Collège de France, la chaire de géologie, — l'ancienne chaire d'Histoire naturelle des corps inorganiques, — devenue vacante par la mort d'Auguste Michel-Lévy (1911). Pendant vingt-quatre ans il donna, au Collège de France, un enseignement qu'alimentaient ses propres recherches sur la pétrographie des roches sédimentaires (2).

(2) Un résumé des cours de L. Cayeux est publié dans l'*Annuaire du Collège de France* des années scolaires 1912-1913 à 1935-1936 incluses. Voir la liste des publications à la fin de la présente notice.

En octobre 1936, L. Cayeux fut, suivant une formule administrative en usage en France, « admis à faire valoir ses droits à une pension de retraite ». Cette mesure, qui faisait suite à un récent décret abaissant l'âge de la retraite, le privait de trois années d'enseignement. Cayeux en ressentit de l'amertume, car son activité scientifique continuait d'être intense, et le programme qu'il s'était tracé au Collège de France demeurait inachevé.

Dans le but de se créer des loisirs, pour travailler, il avait, en 1930, abandonné son enseignement à l'Institut agronomique. C'est à ses études de prédilection qu'il allait désormais consacrer tout son temps. Il les poursuivit, jusqu'en 1939, dans un laboratoire de recherches que l'Ecole des Mines avait mis à sa disposition et qu'outillèrent plusieurs grandes Sociétés minières et métallurgiques.

Le Service de la Carte géologique de la France recrute la plupart de ses collaborateurs bénévoles parmi les géologues des Universités et des grands Etablissements scientifiques. Dès 1889, Cayeux était attaché à ce Service. Il fut nommé collaborateur adjoint en 1894, collaborateur principal et membre de la Commission spéciale de la Carte en 1924.

L'œuvre scientifique de Lucien Cayeux.

L'œuvre capitale de Lucien Cayeux — celle où il fait figure de fondateur — est l'étude micrographique des roches sédimentaires. Sa thèse de doctorat [62] ⁽³⁾ inaugure la série des grands mémoires qu'il a consacrés à ces roches. Elle renferme l'étude de la craie du bassin de Paris et celle de quelques roches siliceuses, particulières (gaizes, meules, tuffeaux), des terrains secondaires et tertiaires du Nord de la France et de la Belgique.

A l'époque où L. Cayeux entreprenait ses recherches, l'étude des roches éruptives et des roches métamorphiques avait déjà fait, tant en France qu'à l'étranger, de rapides progrès. L'étude des roches sédimentaires, qui se prête moins bien à

(3) Les numéros entre crochets sont ceux des mémoires et des notes dans la liste chronologique des publications de L. Cayeux placée à la fin de cette notice.



Lucien Cayeux

Lucien CAYEUX
(1864-1944)

l'analyse optique et présente, au premier abord, moins d'attrait, était à peu près complètement délaissée. Pour y réussir, il fallait être, tout à la fois, pétrographe, paléontologiste et stratigraphe; il fallait aussi avoir recours à l'analyse chimique. Cayeux réunissait toutes les conditions nécessaires.

Dans sa thèse de doctorat, il adopte une méthode et se propose un but qui resteront les mêmes dans ses travaux ultérieurs. Il décrit les éléments composants des roches soumises à l'examen : les minéraux détritiques; les minéraux de néoformation, qui ont pris naissance dans la roche même et qu'il qualifie de secondaires; les restes d'organismes qui prennent part à la composition de la roche; le ciment qui lie tous les éléments précédents. Il cherche ensuite à établir la nature du sédiment initial et l'origine de ses éléments détritiques. Il suit enfin les modifications que le sédiment a subies depuis son dépôt.

A la lumière des données fournies par la célèbre campagne du *Challenger*, sur la nature des sédiments en voie de formation au fond des mers actuelles, Cayeux cherche à déterminer les conditions dans lesquelles se sont déposés les sédiments des mers anciennes : il crée la Paléo-océanographie.

Dans la série des grands mémoires qu'il a consacrés aux roches sédimentaires, et plus particulièrement aux roches sédimentaires de France, il a étudié d'une manière approfondie : 1° la craie et quelques dépôts siliceux du bassin de Paris [62], qui firent, comme il a été dit plus haut, l'objet de sa thèse de doctorat; 2° les minerais de fer oolithique [108, 180]; 3° les roches siliceuses [212]; 4° les roches carbonatées (calcaires et dolomies) [251]; 5° les phosphates de chaux de la France métropolitaine et de la France d'outre-mer [278, 284, 285].

Entre-temps, L. Cayeux avait publié une *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires* [153], qui est, pour ces roches, ce qu'a été, pour les roches éruptives, la célèbre *Minéralogie micrographique* de Fouqué et Michel-Lévy. Dans cette Introduction, l'auteur décrit les méthodes d'analyses propres aux roches sédimentaires et les caractères des éléments composants, minéraux et organiques. Une abondante illustration accompagne le texte.

Ce livre a trouvé auprès des géologues une faveur immense : paru en 1916, il était épuisé en 1927.

LES ROCHES SÉDIMENTAIRES DE FRANCE.

I. — La craie du bassin de Paris.

Dans la craie du bassin de Paris, le rôle des minéraux détritiques est extrêmement faible : le quartz, accompagné d'une foule d'autres espèces minérales, est l'élément prépondérant.

Les minéraux secondaires sont nombreux; les principaux sont : la calcite, la glauconie, le phosphate de chaux et la dolomite.

Les organismes, qui consistent surtout en débris microscopiques de fossiles de grande taille et en microorganismes, appartiennent à de nombreuses classes du règne animal et à la classe des Algues, laquelle est représentée par des Diatomées et surtout par des Coccolithes et des Rhabdolithes, qui abondent.

Le ciment est formé par l'ensemble des particules minérales et des débris d'organismes de dimensions si restreintes qu'il est impossible, sous un faible grossissement, d'en préciser la nature et la forme. Il est d'autant plus développé que la craie est plus fine et, par conséquent, qu'elle occupe, dans la série des assises crayeuses du bassin de Paris, un niveau plus élevé. De sorte que l'examen micrographique de la craie du bassin de Paris peut devenir, à l'occasion, un précieux auxiliaire du stratigraphe.

Comme on l'a dit, il y a longtemps déjà, la craie est pareille à la « craie moderne », — la boue à Globigérines, — qui se dépose dans les zones bathyale et abyssale des océans actuels. Mais contrairement à l'opinion courante, qui la considérerait comme un dépôt de mer profonde, Cayeux montre que la craie du bassin de Paris est un dépôt terrigène (néritique). Il établit encore que la mer du bassin de Paris était parcourue, pendant le Crétacé supérieur, par des courants : des courants de surface, en particulier un courant qui, venant du bassin d'Aquitaine, passait par le détroit du Poitou; des courants de fond, dont l'existence est révélée par des « hard-grounds ».

II. — Les minerais de fer oolithique.

De l'étude de la craie et de quelques roches siliceuses du Nord de la France qui avait fait l'objet de sa thèse de

doctorat, Cayeux est passé directement à celle des minerais de fer oolithique, et voici comment :

La glauconie, qui est fort répandue dans la craie et dans les roches siliceuses, crétacées et tertiaires, y est souvent altérée et transformée en limonite. Or, les oolithes ferrugineuses, qui sont formées de limonite et que l'on rencontre dans les terrains jurassiques et primaires, cessent d'exister dès que la glauconie fait son apparition en grande quantité dans l'Infracrétacé. Cayeux soupçonna un lien de parenté entre la limonite des minerais de fer oolithique ou pseudo-oolithique et la glauconie. Il entreprit alors l'étude systématique des minerais de fer oolithique [64] dont les résultats sont développés dans deux mémoires : l'un sur les minerais de fer primaires [108], l'autre sur les minerais de fer jurassiques [180].

Cayeux constate que les oolithes ferrugineuses des minerais de fer primaires sont construites sur le type des oolithes calcaires. Elles sont constituées soit par du carbonate de fer (sidérose), soit par de la chlorite (bavalite, etc.), soit par de l'hématite rouge ou brune, soit enfin — et le plus souvent — par une association de ces trois minéraux. Ces substances sont des témoins d'une série de compositions successives qu'ont présentées les oolithes au cours de leur histoire. Dans certaines oolithes elles sont disposées dans l'ordre de leur ancienneté : la sidérose au centre, la bavalite dans la partie moyenne, l'hématite à la surface. Les oolithes, d'abord carbonatées, devinrent chloriteuses, puis ferrugineuses.

Quant à la composition et à l'évolution minéralogique du ciment qui lie les oolithes, elles sont les mêmes que celles de ces oolithes, mais avec cette différence que l'évolution minéralogique est presque toujours en retard sur celle des oolithes. Il arrive souvent que des minerais, hématisés par leurs oolithes, sont carbonatés par leur gangue.

Des minerais, apparemment oolithiques, sont formés, en réalité, de débris organiques — le plus souvent des débris d'Encrines et de Bryozoaires — roulés et arrondis. Au nombre de ces minerais se trouve celui du Couvinien du massif primaire gallo-belge. Ces pseudo-oolithes ont subi une évolution semblable à celle des vraies oolithes, mais sont restées partiellement calcaires.

Il n'est pas douteux que les débris d'organismes des minerais de fer pseudo-oolithique étaient primitivement calcaires et que ces minerais de fer dérivent d'anciens calcaires zoogènes.

Il y a lieu de croire aussi que la plupart des minerais de fer oolithique ont un point de départ analogue et qu'ils dérivent d'anciens calcaires oolithiques.

Les minerais de fer mésozoïques, qui s'échelonnent du Lias au Crétacé inférieur inclusivement, sont construits sur le même type que les minerais de fer paléozoïques. Les oolithes peuvent franchir les mêmes stades que les oolithes des minerais paléozoïques; parfois elles passent directement du stade calcaire au stade hématite. Dans les minerais de fer mésozoïques, les restes de Crinoïdes sont nombreux et leur minéralisation marche de pair avec celle des oolithes. Dans ceux de la Lorraine, on observe au cours de l'évolution minéralogique des oolithes des arrêts de développement dus à des remaniements.

Pour L. Cayeux, l'élaboration des minerais aux dépens des calcaires s'est faite rapidement, sous la mer, à proximité des rivages.

Le fer qui s'est substitué aux calcaires, pour engendrer les minerais, est fourni par le démantèlement des chaînes de montagnes. Il a sa source dans la magnétite des roches éruptives et métamorphiques, dans des silicates complexes comme la biotite, les amphiboles, les pyroxènes, le péridot, etc., et aussi dans les oxydes, sulfures et silicates de fer des roches sédimentaires.

Chaque chaîne de montagnes démantelée — que ce soit la chaîne huronienne, la chaîne calédonienne ou la chaîne hercynienne — a son cortège de minerais de fer sédimentaires : la chaîne huronienne a les minerais siluriens de la Basse-Bretagne, de l'Anjou et de la Basse-Normandie; la chaîne calédonienne, les minerais de fer couviniens du massif primaire gallo-belge et les minerais famenniens du synclinal de Namur; la chaîne hercynienne, les minerais de fer heftangiens de la Bourgogne, les minerais aaléniens de l'Est du bassin de Paris, du Jura et du bassin du Rhône, les minerais calloviens et oxfordiens du département français des Ardennes.

Les recherches de L. Cayeux sur les minerais de fer ordoviciens de la Basse-Normandie eurent une portée pratique considérable. Elles révélèrent une extension des gîtes vers l'Est, sous la bordure occidentale du bassin de Paris, au delà des limites connues [109, 140, 145, 146]. Elles laissent même supposer que la formation se développe, en s'épaississant peut-être,

plus à l'Est encore, sous le bassin de Paris même. Elles montrèrent aussi que le minerai va en s'enrichissant dans la profondeur. En effet, le quartz peut épigéniser partiellement — parfois même à peu près complètement — la sidérose qui forme le noyau des oolithes, et cette quartzification diminue à mesure qu'on s'éloigne de la surface du sol.

III. — Les roches siliceuses.

Dans sa thèse de doctorat, Cayeux avait déjà réservé une grande place à l'étude de roches siliceuses spéciales (tuffeaux, meules, gaizes, etc.), que l'on rencontre dans l'Eocène et le Crétacé du Nord de la France et de la Belgique, et qui se groupent autour de la gaize de l'Argonne. Ce sont, en général, des grès riches en spicules d'Eponges et dont la teneur en silice soluble dans la potasse est exceptionnellement élevée.

Quelques années plus tard, il avait décrit la structure d'une série de grès du bassin tertiaire franco-belge (grès du Landénien continental du bassin belge, grès dits à *Nummulites lævigatus* du Nord de la France, grès de Beauchamp, grès de Fontainebleau) [97].

En 1929, il complète l'étude de tous ces grès dans un gros mémoire consacré à l'ensemble des roches siliceuses [212].

Dans ces roches il distingue les trois grandes classes suivantes :

- 1° Les roches siliceuses d'origine essentiellement détritique;
- 2° Les roches siliceuses d'origine essentiellement organique;
- 3° Et, dérivant de ces dernières par une remise en mouvement de la silice organique, les roches siliceuses d'origine essentiellement chimique.

Il va sans dire que ces trois classes forment une série ininterrompue, dans laquelle les coupures présentent forcément un caractère arbitraire.

A la première classe appartient l'immense majorité des roches siliceuses meubles (blocs, galets, graviers, sables, poussières et boues) et de leurs représentants consolidés [conglomérats (brèches et poudingues), grès et quartzites]. Toutes ces roches sont soumises à l'analyse, en particulier les sables et les grès, dont la variété est infinie.

Comme on vient de le voir, L. Cayeux s'était déjà attaché spécialement à l'étude des grès tertiaires du Nord de la

France [97] : des grès du Landénien continental, qui offrent tous les passages des grès proprement dits aux quartzites; des grès lutétiens, remaniés à la base du Quaternaire (grès dits à *Nummulites lævigatus*), dans lesquels une silice de néoformation s'est substituée au calcaire du ciment primitif.

Les roches de la deuxième classe comprennent les gaizes du bassin de Paris, les spongolithes, certaines roches du Crétacé de la Belgique (meule, smectique, etc.) et certains tuffeaux de l'Éocène inférieur de la région gallo-belge. Les organismes siliceux qui prennent part à leur formation sont des Spongiaires, des Radiolaires et des Diatomées.

Les gaizes typiques — dont le prototype est la gaize vraconienne de l'Argonne — sont caractérisées par une forte teneur en silice soluble dans la potasse et par leur richesse en spicules de Spongiaires. Elles renferment du quartz, en proportion variable, et de la glauconie. Organismes et minéraux sont agglutinés par un ciment d'opale, faiblement calcarifère, additionné d'argile et souvent aussi de calcédoine.

La « meule » proprement dite, — la meule de Bracquegnies, dans le Hainaut belge, — bien que dépourvue de calcaire, possède les caractères essentiels de la gaize de l'Argonne, dont elle est l'exact équivalent stratigraphique.

Les roches auxquelles L. Cayeux a donné le nom de spongolithes sont des gaizes qui sont presque entièrement formées de spicules d'Eponges. Le prototype des spongolithes est une roche subordonnée à la meule de Bracquegnies.

Des roches analogues sont connues dans le Campanien de Langeais (Indre-et-Loire), dans l'Oxfordien du département des Ardennes, dans l'assise de Chokier (Westphalien inférieur), en Belgique, où Bellière les a signalées. Toutes ces spongolithes ont été engendrées en milieu marin, mais Cayeux a reconnu, dans de soi-disant bancs de silex du Stéphanien du Gard, une véritable spongolithe formée de spicules d'Eponges d'eau douce.

La silice du ciment des spongolithes et des gaizes provient surtout de la dissolution de spicules au fond même de la mer ou du bassin lacustre, à la surface du sédiment; la silicification du ciment serait, en grande partie, contemporaine ou presque de la sédimentation.

La « smectique » du pays de Herve, qui appartient au Campanien, est une gaize calcarifère, que caractérise toujours l'abondance des spicules d'Eponges, mais qui renferme aussi

des Radiolaires, que Cayeux a décrits. Bien que peu nombreux, ces Radiolaires présentent une grande variété de formes, dans lesquelles Cayeux n'a pas distingué moins de vingt-sept genres.

Quoique, en général, plus riches en éléments détritiques et plus pauvres en spicules d'Eponges que ne le sont les gaizes, c'est encore à ces dernières que se rattachent les « tuffeaux » à pâte fine de l'Eocène inférieur du Nord de la France et de la Belgique. Les frustules de Diatomées, absentes ou rares dans les gaizes, la meule et la smectique, font rarement défaut dans les tuffeaux, où on les trouve parfois en abondance.

Les tuffeaux passent insensiblement aux grès opalifères.

Les dépôts dans la composition desquels entrent des Radiolaires sont exclusivement marins. Ceux qui, dans les mers actuelles, sont essentiellement formés de ces organismes constituent les « vases à Radiolaires »; on ne les trouve que dans les grands fonds océaniques.

Toute une série de noms (jaspe, lydienne, radiolarite) ont servi à désigner ceux des mers anciennes; un autre nom (chert) leur a été étendu d'une façon abusive; le nom de phtanite, sous lequel Haüy désignait une roche qui se rattache effectivement aux dépôts à Radiolaires, a été, par la suite, appliqué à des roches qui en sont différentes.

La plupart des jaspes, les lydiennes et les « cherts à Radiolaires » de l'Ordovicien d'Ecosse forment, dans la classe des roches siliceuses d'origine essentiellement organique, un groupe homogène, — les jaspes à Radiolaires, — qui est caractérisé par le fait que les organismes composants sont des Radiolaires et rien que des Radiolaires.

Les jaspes à Radiolaires sont dépourvus d'éléments détritiques. Leur pâte est très fine. Ils sont très opaques, le plus souvent teintés par de l'oxyde de fer, parfois par des matières charbonneuses, qui les colorent en noir (lydiennes). Minéralogiquement, ils sont formés en très grande partie de calcédonite, qu'accompagne un peu de substance argileuse.

Les auteurs qui ont comparé les jaspes aux vases à Radiolaires actuelles ont exprimé, au sujet du milieu générateur des jaspes, des avis différents. Les uns, considérant les jaspes en eux-mêmes, les ont assimilés, à tous égards, aux vases à Radiolaires et les ont regardés comme des dépôts de mers

très profondes. Les autres, tenant compte de ce que les jaspes sont parfois accompagnés de dépôts détritiques, ont conclu qu'ils avaient pris naissance dans des conditions bathymétriques différentes.

A ce sujet, l'opinion de Cayeux est formelle. Le milieu générateur des jaspes ne différerait par rien d'essentiel de celui qui engendre aujourd'hui les vases à Radiolaires : les conditions bathymétriques sont comparables. Les jaspes se sont déposés en des points où n'arrivaient pas les éléments détritiques, à des profondeurs qui excluaient la présence de Spongiaires et celle d'organismes — comme les Foraminifères — dont la coquille calcaire était dissoute avant d'arriver au terme de sa chute. Les jaspes à Radiolaires seraient les seules roches connues que l'on puisse comparer aux vases à Radiolaires qui se déposent actuellement dans les grands fonds océaniques.

Aux jaspes, L. Cayeux rattache les roches qui répondent à la définition que Haüy donnait du phtanite. De semblables roches forment des lits interstratifiés dans les schistes précambriens et les schistes gothlandiens du massif armoricain. Elles dérivent d'une vase fine, qui s'est formée à la manière de la vase à Radiolaires, sans cependant lui être identique.

Les Diatomées vivent et se multiplient avec une étonnante rapidité, aussi bien en milieu marin qu'en milieu lacustre. Leurs frustules y forment, par leur accumulation, des dépôts, les « vases à Diatomées ».

Les vases à Diatomées marines renferment, en plus des Diatomées, des Foraminifères et, presque toujours, des spicules d'Eponges.

Les vases à Diatomées fossiles ne datent que du Tertiaire. Plus ou moins consolidées, elles forment les diatomites.

Les terrains tertiaires de l'Afrique du Nord renferment des dépôts à Diatomées marines : le « tripoli d'Oran », d'âge sahélien, qui a conservé ses caractères originels; les phosphates éocènes de Gafsa et de Tébessa, qui sont d'anciennes vases à Diatomées, dans lesquelles le phosphate de chaux s'est substitué à la silice des frustules. Dans une diatomite pliocène du Japon, c'est la calcite qui se substitue à la silice.

On a vu plus haut que les tuffeaux éocènes du Nord de la France et de la Belgique renferment, en plus ou moins grand nombre, des frustules de Diatomées. Mais les éléments détritiques dominent dans ces tuffeaux, qui sont des grès opalifères

à Diatomées. Ce n'est qu'en certaines plages, où les frustules sont rassemblées en masse, que la roche présente les caractères d'une diatomite.

Des vases à Diatomées se déposent actuellement dans de nombreux lacs de France, surtout dans les lacs auvergnats. C'est aussi en Auvergne que l'on trouve le plus de diatomites lacustres; elles s'y échelonnent de l'Oligocène au Pléistocène inclus.

Les « schistes de Menat » (Puy-de-Dôme) constituent, au bord de la vallée de la Sioule, un dépôt très particulier et très localisé, que sa faune ichthyologique et sa flore rattachent à l'Oligocène. Certaines de ses parties sont formées par des frustules de Diatomées et des spicules d'Eponges lacustres, le tout agglutiné par un ciment d'opale. A cette roche, où dominent les frustules de Diatomées, Cayeux a donné le nom de spongo-diatomite.

Dans les roches siliceuses d'origine essentiellement organique, la migration de la silice organique n'aboutit guère qu'à une transformation du ciment originel; elle n'efface pas ou n'efface que partiellement la nature organique de la roche.

Dans les roches siliceuses de la troisième classe, — les roches siliceuses d'origine essentiellement chimique, — toute la silice des organismes a été remise en mouvement; les organismes générateurs paraissent absents ou ne jouer qu'un rôle négligeable. De plus, les produits de substitution que constituent ces roches ne se forment habituellement plus dans le milieu originel, mais dans des dépôts qui les conditionnent, qui, en général, ne sont pas essentiellement siliceux, et dans lesquels ils se présentent comme des accidents siliceux. Tels sont : les cherts dans les milieux siliceux; les silex, les chailles et les silexites dans les milieux calcaires d'origine marine; les meulière dans les milieux calcaires d'origine lagunaire ou lacustre, etc.

L. Cayeux restitue au terme « chert », dont on a fait un large abus, le sens restreint qu'il avait au début. Trois éléments, étroitement associés, — des spicules d'Eponges, l'opale et la calcédoine, — constituent le chert. Les spicules d'Eponges sont généralement transformés en calcédonite, et, par la grande place qu'il occupe, ce dernier élément différencie le chert de la roche qui l'englobe.

Les cherts se présentent dans les roches qui les enclavent

comme des noyaux durcis, mal individualisés, adhérents à leur gangue, à laquelle ils passent insensiblement. Ils se sont formés dans des roches siliceuses dont le ciment était, à l'origine, plus ou moins calcarifère. Dans le Nord de la France et en Belgique, ils sont subordonnés aux gaïzes, aux spongolithes et à des tuffeaux.

Les silex sont les accidents siliceux de la craie; leur structure est cryptocristalline; ils renferment souvent des débris organiques, surtout des spicules d'Eponges, toujours calcédonieux. Ils sont recouverts d'une patine — une mince croûte blanchâtre — qui les sépare nettement de la craie ambiante, dont ils se détachent facilement. Ils ont une individualité que ne possèdent pas les cherts.

Les chailles sont les accidents siliceux des calcaires jurassiques. Contrairement aux silex, elles font corps avec la gangue. Elles renferment du quartz élastique et conservent des témoins calcaires. Elles représentent des portions de calcaire en voie de silicification et jamais complètement silicifiées.

Les accidents siliceux des calcaires carbonifères ont été respectivement désignés, en Belgique et dans le Nord de la France, sous les noms de cherts et de phtanites. Ce ne sont, au sens strict, ni des cherts ni des phtanites. Ils ont de grandes affinités avec les silex de la craie, et Cayeux les désigne sous le nom de silexites.

Les silexites sont plus riches en quartz que les silex. Elles sont moins individualisées; contrairement aux silex, elles sont intimement soudées à la gangue. Leur cassure est plus irrégulière, leur aspect plus terne et leur opacité plus grande. Elles sont le résultat de la silicification de parties de calcaire carbonifère, mais cette silicification laisse subsister des témoins calcaires, qui sont beaucoup plus répandus que dans les silex de la craie.

Les silex de la craie ont fait, depuis la fin du XVIII^e siècle, l'objet de nombreuses recherches, et, vers la fin du siècle dernier, surtout à la suite des travaux de Wallich et de Sollas, il était établi que les silex sont le résultat de l'épigénie de la craie par une silice d'origine organique, fournie en majeure partie par des spicules d'Eponges.

L. Cayeux s'est livré à une étude approfondie des silex de la craie. Il a examiné avec grand soin leur mode de gisement, — en rognons, en lits, en veines, — leurs caractères physiques, leur microstructure, la formation de leur patine.

Ses conclusions sur l'époque de leur formation sont venues modifier quelques idées en cours. Selon lui, la formation des silex a dû être rapide; celle des silex en rognons ou en lits a suivi de très près le dépôt de la boue crayeuse; celle des silex en veines a été plus tardive, mais elle était achevée au moment de l'émersion de la craie. La formation des silex fut un phénomène sous-marin.

Dans le cas des craies magnésiennes du bassin de Paris, la dolomitisation a été postérieure à la formation des silex ou ne lui a été contemporaine qu'à son début.

L'histoire des silexites est calquée sur celle des silex, à la différence près que, dans les calcaires dolomitiques du Carbonifère, la dolomitisation a débuté avant la silicification et s'est poursuivie jusqu'après la formation des silexites.

De tous les accidents siliceux survenus en milieu calcaire, lagunaire ou lacustre, le plus important est celui réalisé par la meulière. L'étude que L. Cayeux a faite de la meulière porte sur la Meulière de Brie et la Meulière de Beauce, qui ont un grand développement dans la partie méridionale du bassin de Paris. Ces meulières sont tantôt compactes, à grain serré, tantôt plus ou moins riches en vides, celluleuses ou spongieuses.

Si l'on met à part le carbonate de chaux, dont on peut retrouver des témoins en toutes proportions, les meulières sont formées de deux éléments minéralogiques principaux : la calcédonite, qui prédomine généralement, et le quartz. L'opale, comme élément accessoire, les accompagne.

Les restes d'organismes qui ont participé à la formation des roches mères et qui sont, par places, conservés dans les meulières, comprennent : des coquilles de Mollusques, des oogones et des tiges de *Chara*, des Algues calcaires, des frustules de Diatomées.

Comme la formation des silex, des chailles et des silexites, la meuliérisation résulte d'un phénomène d'épigénie du carbonate de chaux. Elle n'a jamais envahi la totalité des calcaires lacustres dans lesquels elle s'est produite. Des parties ont pu complètement lui échapper, de sorte que les plages silicifiées se trouvaient enrobées dans une gangue exclusivement calcaire. Ces plages pouvaient elles-mêmes conserver des témoins calcaires. De sorte que la décalcification totale a, tout à la fois, libéré les plages silicifiées, sous forme de blocs isolés, et trans-

formé ces plages en meulière spongieuse. Le résidu de la décalcification est une substance plus ou moins argileuse, ferrugineuse, teintée en brun, rouge ou gris, parfois bigarrée, qui est connue sous le nom d'argile à meulière. C'est une formation comparable à l'argile à silex. Les blocs de meulière, de toutes dimensions et de toutes formes, gisent dans l'argile à meulière.

Dans le problème de la meulièrement, la question principale est celle de l'origine de la silice. Plusieurs théories attribuaient à celle-ci une origine interne; d'après une autre, la source de la silice devrait être cherchée dans des dépôts recouvrant ou ayant recouvert la formation meulièrement.

Pour Cayeux, la silice qui a transformé les calcaires lacustres en meulières est d'origine organique; elle fut empruntée aux calcaires lacustres mêmes. Et, se basant sur le rôle considérable que jouent les Diatomées dans la constitution des dépôts de toute une série de lacs français, il trouve la source de cette silice dans les Diatomées, qui devaient être innombrables dans les anciennes boues lacustres de Brie et de Beauce, mais dont un petit nombre seulement sont conservées dans les meulières.

IV. — Les roches carbonatées (calcaires et dolomies) [251].

LES ROCHES CALCAIRES. — L. Cayeux distingue deux grandes catégories de roches calcaires : les calcaires d'origine marine et les calcaires lacustres.

Dans le chapitre qu'il a consacré aux calcaires d'origine marine, il passe en revue les sédiments calcaires récents; d'abord ceux qui sont en voie de formation dans les mers actuelles : les calcaires construits, les vases à Globigérines, les vases à Ptéropodes; puis la « craie » à Globigérines et à Radiolaires de la « série océanique » de l'île de Barbade (Petites-Antilles), série qui se place à la limite du Pléistocène et du Néogène. Il soumet ensuite à l'analyse les nombreuses variétés, organiques et minéralogiques, que présentent les craies et les calcaires proprement dits. Il s'étend enfin sur les structures offertes par les calcaires marins, structures qui sont elles-mêmes fort variées, et dont quelques-unes, comme la structure bréchoïde, soulèvent encore d'importants problèmes.

Une étude particulière est consacrée par L. Cayeux aux brèches du Dinantien des bassins de Namur et de Dinant : à la « grande brèche » ou « brèche grise », qui est une brèche

sédimentaire, située à la base de l'assise à *Productus giganteus*; à la « brèche rouge », dont l'origine et le gisement ont alimenté de nombreuses discussions. Cette dernière brèche a pour type la brèche rouge de Landelies, que les uns assimilent à la grande brèche et qui, pour les autres, est une formation continentale subaérienne, datant de la fin du Dinantien. C'est à cette dernière conclusion que conduit l'étude pétrographique de Cayeux.

A propos de la structure noduleuse, il décrit en détail les types de structure qui sont représentés dans les craies du bassin de Paris et qui tous datent de l'époque de la sédimentation. L'apparition de bancs de craie noduleuse ou de nodules isolés, dans la craie du bassin de Paris, est accompagnée de modifications dans la composition minéralogique et dans la faune; elle correspond à des changements brusques du milieu, à ce que Cayeux appelle des ruptures d'équilibre.

La fréquence des ruptures d'équilibre, dans la craie du bassin de Paris, montre une nouvelle fois que le milieu générateur de la craie diffère, à beaucoup d'égards, de celui où se forme actuellement la boue à Globigérines.

Dans son analyse de la structure oolithique, Cayeux passe en revue les milieux générateurs d'oolithes, à l'époque actuelle et aux époques anciennes. Il étudie la morphologie et la microstructure des oolithes, les modifications que celles-ci subissent pour aboutir à l'effacement de la structure oolithique.

Après un exposé critique des théories proposées pour expliquer la genèse des oolithes, il fixe les termes du problème pour le poser correctement. Il déclare n'avoir pu reconnaître, dans l'enveloppe corticale de l'oolithe, aucune structure organisée, et il reste fidèle à la vieille notion qui fait de l'oolithe une concrétion.

Enfin, à propos des calcaires marins, il examine rapidement les structures cone-in-cone et stylolithique.

Les calcaires lacustres proviennent de la consolidation de boues calcaires, analogues à celles qui se déposent dans les lacs actuels, et qui proviennent de la précipitation — le plus souvent par l'intervention d'organismes — du bicarbonate de chaux en dissolution dans l'eau des lacs.

Les analyses de Cayeux portent sur les calcaires lacustres, tertiaires, du bassin de Paris, — surtout sur le Calcaire de

Brie et le Calcaire de Beauce, — et sur les calcaires lacustres de la Limagne et du bassin d'Aquitaine.

Ces calcaires lacustres sont, en général, pauvres en éléments détritiques. Les organismes calcaires qui entrent dans leur constitution sont des Algues, des Mollusques (Limnées, Planorbes, etc.) et des Ostracodes.

Leur composition chimique est très uniforme. Les matières susceptibles de s'ajouter au calcaire ne comprennent qu'un peu d'argile, de l'oxyde de fer, et, accidentellement, un peu de matière pigmentaire, rapportée au bitume, qui leur donne une coloration noirâtre.

Si les calcaires lacustres présentent, dans leur composition chimique, une grande uniformité, et si les groupes d'organismes qui participent à leur formation sont peu nombreux, par contre, ils offrent, dans leur structure, une grande variété; on peut y observer presque tous les types de structure : compacte, cryptocristalline, sublithographique, microgrenue, vermiculée, vacuolaire, grumeleuse, pseudo-oolithique, — rarement oolithique, — pseudo-bréchoïde, bréchoïde et conglomérée.

LES ROCHES DOLOMITIQUES. — De toutes les roches sédimentaires, les roches dolomitiques sont, après la craie et les silex, celles qui ont été le plus étudiées. L. Cayeux leur a consacré un chapitre important, dans lequel sont soumis à l'analyse microscopique : de nombreuses craies du bassin de Paris, dites magnésiennes ou dolomitiques; des calcaires proprement dits, magnésiens ou dolomitiques; des sables dolomitiques, crétacés et tertiaires; enfin, des dolomies typiques.

A la suite de cette analyse, Cayeux aborde le difficile problème, tant de fois soulevé mais non encore résolu, de la genèse de la dolomite.

On sait que de nombreux groupes d'organismes marins, animaux ou végétaux, en particulier ceux qui interviennent dans l'édification des récifs, ont la propriété de fixer, à l'état de carbonate, les sels de magnésie (sulfate et chlorure) en dissolution dans l'eau de mer. Le carbonate de magnésie ainsi formé passe dans les sédiments auxquels ces organismes seront incorporés. La question qui se pose est de savoir comment on passe de la concentration du carbonate de magnésie, réalisée par les organismes, aux phénomènes de dolomitisation enregistrés par les récifs, en particulier par l'atoll de Funafuti, dans les îles d'Ellice (Pacifique), qui fut spécialement étudié à ce sujet. Les données des sondages effectués à Funafuti n'ont

pas permis de saisir le phénomène sur le vif, mais elles apportent deux faits nouveaux : à savoir que la dolomie, en certaines parties de l'atoll, est une dolomie épigénique et que la dolomitisation est un phénomène sous-marin.

Les milieux générateurs de la dolomie ont été plus variés aux époques géologiques qu'ils ne le sont à l'époque actuelle. Parmi les dolomies anciennes, il existe, en effet, en plus des dolomies marines, qui sont de beaucoup les plus nombreuses, des dolomies lagunaires et même des dolomies lacustres, dont on ne connaît, toutefois, que de rares exemples.

Bon nombre de dolomies anciennes, marines, doivent leur origine à des organismes magnésiens. Beaucoup d'autres et, avec elles, les dolomies lagunaires et les dolomies lacustres sont dues à des apports magnésiens. Enfin, un certain nombre de dolomies résultent de la décalcification de calcaires magnésiens.

Les anciens auteurs supposaient que les apports magnésiens se faisaient soit par des vapeurs, soit par des sources qui jaillissaient au fond de la mer. L'analyse microscopique à laquelle s'est livré Cayeux montre que la plupart des dolomies résultent d'un phénomène de substitution, qu'elles sont épigéniques, comme certaines dolomies de l'atoll de Funafuti.

La source de la dolomite se trouve rarement dans des vapeurs ou des sources magnésiennes. Elle est, pour l'immense majorité des cas, dans les sels de magnésie que contient l'eau de mer. Le problème de la dolomitisation consiste à savoir comment se fait la fixation de la magnésie par les sédiments calcaires et quelles sont les réactions qui, dans des conditions normales, engendrent le carbonate double de chaux et de magnésie. Le problème est du ressort de la chimie, peut-être de la chimie biologique. Les travaux de L. Cayeux apportent des données qui en préparent la solution.

V. — Les roches phosphatées de la France métropolitaine et de la France d'outre-mer.

Les phosphates de chaux sédimentaires sont connus depuis le Cambrien, mais ils ne commencent à prendre une certaine importance qu'au Dévonien. Leur formation atteint deux maxima, qui furent réalisés, l'un, à l'époque permienne, dans les Montagnes Rocheuses, l'autre à une époque qui comprend la fin du Crétacé et le début du Tertiaire. Cette dernière

époque marque l'apogée de la sédimentation phosphatée; elle a produit les plus beaux gîtes du monde : ceux du Maroc, de l'Algérie et de la Tunisie.

Depuis, la formation phosphatée est en régression; elle est tombée presque à zéro à l'époque actuelle, et l'on sait peu de chose sur les très rares dépôts de phosphate qui s'effectuent aujourd'hui dans les mers.

Bien que le but visé soit l'étude des roches phosphatées de la France métropolitaine et de la France d'outre-mer, L. Cayeux a élargi considérablement le cercle de ses investigations pour trouver, dans les gîtes d'autres régions, des sources d'information. Il s'était proposé de publier en trois volumes les résultats de ses recherches. Seuls les deux premiers ont paru : l'un [278] concerne tous les phosphates paléozoïques et mésozoïques, à l'exception des phosphates africains; l'autre [284] est réservé aux phosphates d'Égypte, de Tunisie et d'Algérie.

La troisième et dernière partie de ce monumental ouvrage était presque achevée à la mort de Lucien Cayeux; elle sera publiée ultérieurement, dans l'état où il l'a laissée. La matière en est constituée par les phosphates du Maroc, de l'Afrique occidentale et de l'Afrique équatoriale françaises, par les rares formations phosphatées qui gisent au fond des mers actuelles et par les conclusions.

A propos des phosphates dinantiens des Pyrénées et de la Montagne Noire, L. Cayeux passe, en revue la plupart des gîtes de phosphates paléozoïques : les gîtes du Cambrien de la Suède, du Silurien d'Angleterre, d'Esthonie et de Russie, du Silurien et du Dévonien du Tennessee (États-Unis), du Dinanien de la Pologne et du Permien des États-Unis.

Tous ces phosphates paléozoïques constituent un groupe à part, bien distinct de celui des phosphates secondaires et tertiaires. On les rencontre en nodules, rarement en grains. Leur teinte foncée, noirâtre ou brunâtre, est due à la présence de matières charbonneuses. Mais, malgré leur air de famille, ils offrent une grande diversité quant à la nature des organismes qu'ils renferment et au caractère bathymétrique du dépôt qui les contient. Leur analyse détaillée ne révèle l'existence d'aucun groupe d'animaux pouvant être considéré comme la source de leur acide phosphorique.

L. Cayeux attribue à ces phosphates une origine végétale, à laquelle les Algues apporteraient la contribution la plus

importante, et qui expliquerait leur richesse relative en carbone et leur teinte.

Les phosphates noirs des Pyrénées et de la Montagne Noire se trouvent, en nodules, dans des schistes ampéliteux ou dans des lydiennes, qui sont eux-mêmes plus ou moins phosphatés.

Un certain nombre de traits les distinguent de tous les autres phosphates paléozoïques : l'existence de nombreux Radiolaires, à l'exclusion d'autres organismes; l'absence complète d'éléments détritiques; la fréquence de la matière carbonneuse; la structure concrétionnée et cristalline du phosphate.

La roche mère dans laquelle ont pris naissance les nodules était une vase à Radiolaires, qui ne différait des vases à Radiolaires actuelles que par sa teneur en phosphate et en matière carbonneuse. Elle a subi des modifications profondes et ses organismes ont été épigénisés en quartz, en phosphate ou en matière carbonneuse.

Quant aux nodules, ils correspondent à des portions consolidées de la vase à Radiolaires et leur formation n'est que légèrement postérieure à la sédimentation.

C'est sous le facies à nodules qu'on retrouve le phosphate de chaux, en France, dans le Jurassique, l'Infracrétacé et le Cénomanién.

Les nodules phosphatés du Jurassique sont sporadiques et, même lorsqu'ils réalisent leur maximum de fréquence, ils sont dépourvus de tout intérêt économique. Ils sont caractérisés : par la fréquence des éléments détritiques; par la présence de la glauconie, laquelle fait défaut dans les phosphates paléozoïques; par la très grande variété des groupes d'organismes qu'ils renferment et en particulier par l'intervention des Foraminifères. Le phosphate de chaux y apparaît comme un minéral épigénique, fixé aux dépens du carbonate de chaux.

Les nodules infracrétacés ont généralement une couleur noir verdâtre, qui résulte de la présence de la glauconie et de la pyrite. Le quartz y est l'élément détritique le plus répandu, mais son degré de fréquence est très variable. Il en est de même de la glauconie, qui est toujours présente, mais tantôt clairsemée, tantôt abondante, au point de constituer la plus grande partie des nodules; c'est aussi le cas de la pyrite. Les organismes, le plus souvent calcaires, sont peu variés. Le ciment, qui renferme le phosphate, est, dans beaucoup de nodules, tant soit peu calcaire; le carbonate de chaux qu'il

contient représente les derniers témoins d'une gangue originellement calcaire, à laquelle s'est substitué le phosphate de chaux.

Les nodules de l'Infracrétacé (aptiens et albiens) et ceux du Vraconnien, qui sont parfois des nodules albiens remaniés, se présentent en lits et forment en certains points des concentrations importantes. Leur maximum de fréquence et de dispersion est atteint, en Europe, à l'époque albienne. En France, les nodules albiens et les nodules vraconniens sont surtout répandus dans l'Est du bassin de Paris, dans les départements des Ardennes et de la Meuse, où, sous le nom de « coquins », ils furent activement exploités au siècle dernier.

Les nodules albiens du bassin de Paris sont concentrés dans des lits peu épais, que l'on trouve à différents niveaux des sables verts, à *Douvilleiceras mamillare*. Leur histoire s'avère compliquée. Une fois formés, ils ont subi un phénomène de retrait, qui s'est traduit par la formation de fentes. Celles-ci sont remplies par de la pyrite, de la calcite et par une matière fine, phosphatée, d'apparence sédimentaire, mais différente de la gangue des nodules.

Deux générations de phosphate, correspondant à deux milieux générateurs différents, apparaissent donc dans les nodules albiens : formés dans un premier milieu, les nodules ont été remaniés et entraînés dans un autre milieu, où leurs fentes se sont colmatées.

Les concentrations de nodules en lits, dans l'Albien du bassin de Paris, résultent ainsi d'une action mécanique et peuvent être assimilées à des bancs de conglomérats; elles évoquent l'image d'une sédimentation particulièrement troublée.

Les nodules du Cénomaniens forment rarement des concentrations susceptibles d'être mises en valeur. Ils donnèrent lieu, à Pernes-en-Artois (Pas-de-Calais), à une petite exploitation qui fut éphémère. Leur histoire répète celle des nodules albiens. Le milieu dans lequel ils prirent naissance était tout différent de celui où ils gisent; comme les nodules albiens, ils furent soumis à un remaniement sous-marin.

Avec le Turonien, et en liaison avec les sédiments crayeux, apparaît le facies du phosphate en grains, qui prendra un

grand développement dans le Campanien et le Maestrichtien (*sensu lato*) (4).

Dans ce qui fut, à l'époque crétacée, le bassin de Paris, le phosphate turonien à *Micraster Leskei* (*M. breviporus* auct.) n'est guère connu que dans le Cambrésis, où il ne donne plus lieu qu'à de petites exploitations temporaires.

Le phosphate campanien, à *Actinocamax quadratus*, a une aire de dispersion beaucoup plus grande. Il fut activement exploité, à la fin du siècle dernier et au début du siècle actuel, dans le département de la Somme et en quelques points des départements de l'Aisne, du Pas-de-Calais et de l'Oise. Il l'est encore en plusieurs places.

Les gîtes de phosphate maestrichtien sont concentrés aux environs de Mons. Leur exploitation intensive a précédé celle du phosphate de la Somme.

Au cours des périodes d'émergence qui ont suivi le dépôt de toutes ces craies phosphatées, les eaux d'infiltration, chargées d'anhydride carbonique, ont pu décalcifier la partie superficielle des gîtes, lesquels comprenaient, avant leur mise en exploitation, deux parties : une partie inférieure, formée par la craie phosphatée qui a échappé à la décalcification; une partie supérieure, le « sable phosphaté », qui est le résidu insoluble ou peu soluble de la décalcification. Le sable phosphaté est d'inégale épaisseur; il forme en partie le remplissage des poches de décalcification qui s'enfoncent plus ou moins profondément dans la craie sous-jacente. Il fut en très grande partie extrait dans la première phase de l'exploitation des divers gîtes.

La question de la constitution des craies et des sables phosphatés, à laquelle A. Renard et J. Cornet avaient déjà fait faire d'importants progrès, est reprise par L. Cayeux dans une étude d'ensemble très détaillée.

Les craies phosphatées, comme les craies normales, se décomposent en deux parties bien distinctes : les éléments organiques et les minéraux, d'une part, la gangue, d'autre part.

Les éléments organiques et minéraux sont, dans la craie

(4) Ce terme est employé ici dans le sens que je lui ai donné. Voir M. LERICHE, Les Poissons du Crétacé marin de la Belgique et du Limbourg hollandais (note préliminaire). Les résultats stratigraphiques de leur étude (*Bull. Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrol.*, t. XXXVII, 1927, pp. 295-299; 1929).

phosphatée, campanienne, du Nord de la France — la craie phosphatée de Picardie : des grains phosphatés, à noyau organique, formé le plus souvent par un Foraminifère; des grains phosphatés, dépourvus de trace organique; des organismes ou des débris d'organismes libres; des débris de tissu osseux de Poissons et de Reptiles; des concrétions phosphatées submicroscopiques; des éléments crayeux ou phosphatés, parfois volumineux, qui sont remaniés et assimilables à des galets.

La gangue est d'une extrême finesse, pareille à celle de la craie santonienne (craie dite à *Micraster cor anguinum*) et de la craie blanche, à *Actinocamax quadratus*. Elle est parfois plus ou moins phosphatisée.

L'analyse des craies et des sables phosphatés montre que la décalcification qui a donné naissance aux sables phosphatés fut incomplète et que les parties calcaires des « sables » qui avaient échappé à la dissolution ont été phosphatisées par une remise en mouvement de l'acide phosphorique.

La formation phosphatée, campanienne, du Nord de la France débute par un lit congloméré de gros éléments crayeux, durcis, plus ou moins épigénisés en phosphate de chaux, et qu'on désigne sous le nom de nodules. L'immense majorité de ces « nodules » sont plus ou moins arrondis, et, à leur surface, s'incrumentent souvent des organismes fixés (Huitres, Spondyles, etc.). Ils sont en outre criblés de petites perforations remplies par des sédiments crayeux de nature variée. Un enduit brunâtre de phosphate concrétionné s'étend sur toute leur surface, recouvrant les organismes fixés et masquant l'orifice des perforations; il donne aux nodules un aspect vernissé, caractéristique.

Comme l'avait déjà reconnu J. Gosselet, au terme de son étude des gîtes de phosphate de Picardie, ces nodules sont assimilables à des galets. Ils proviennent du remaniement de la craie santonienne. La diversité du remplissage de leurs perforations montre qu'ils furent perforés à plusieurs reprises, qu'ils gagnèrent leur emplacement définitif par étapes successives, correspondant à des fonds et à des sédiments variés.

Au contact de la craie phosphatée de Picardie, la surface durcie de la craie santonienne est elle-même perforée et, comme les nodules phosphatés, recouverte d'une sorte d'enduit mordoré de phosphate de chaux. Sur ce point, J. Gosselet avait laissé une abondante documentation que L. Cayeux a mise à contribution.

Les particularités de la base de la craie phosphatée de Picardie et de son mur montrent que de grandes perturbations ont préludé, dans la mer du bassin de Paris, au dépôt de cette craie. Elles donnent à celle-ci l'aspect d'un dépôt littoral, et c'est effectivement comme tel que fut considérée la craie phosphatée de Picardie. Mais cette craie ne renferme pour ainsi dire pas d'éléments détritiques et sa gangue ne diffère pas de celle des craies qui l'encadrent. Pour L. Cayeux, ces perturbations, — ces « ruptures d'équilibre », qu'accusent encore les plissements que Lasne et J. Gosselet ont observés dans les gîtes de phosphate de Picardie, ont créé, en pleine mer, des conditions de milieu propres à engendrer des dépôts qui, par leurs caractères physiques, rappellent les dépôts littoraux.

Les phosphates maestrichtiens de la région de Mons — les craies phosphatées de Cibly et de Saint-Symphorien — ne diffèrent pas essentiellement, au point de vue lithologique, des phosphates campaniens de la Picardie. Tous ces phosphates renferment deux catégories d'éléments importants : des grains issus de Foraminifères et des grains dérivés de morceaux de craie. Les premiers l'emportent dans la craie phosphatée de Picardie; les seconds, dans la craie phosphatée de Cibly. Et tandis que la craie phosphatée de Picardie est pour ainsi dire dépourvue de silex, la craie phosphatée de Cibly renferme de nombreux accidents siliceux, auxquels on applique couramment le nom de silex, mais qui sont plus apparentés aux cherts qu'aux silex.

Comme dans le Nord de la France et en Belgique, la mer du Crétacé supérieur (Campanien, Maestrichtien) a réalisé, dans les Etats du Levant (Syrie, Palestine, Transjordanie), les conditions favorables à la genèse et à l'accumulation du phosphate de chaux. Comparés aux phosphates du Nord de la France et de la Belgique, ceux des Etats du Levant sont plus grossiers, plus diversifiés et surtout plus riches en restes de Vertébrés (Poissons et Reptiles). L'extraordinaire profusion des fragments de tissu osseux, principalement dans les phosphates de Palestine et de Transjordanie, fait des phosphates des Etats du Levant un type à part, qui n'est encore connu ni en d'autres régions ni à d'autres époques.

Les phosphates d'Égypte, qui appartiennent au Campanien, sont aussi remarquables par la part importante que prennent dans leur constitution les restes de Vertébrés. Mais ils renferment, en plus, des Diatomées. Par ce double caractère, ils établissent un trait d'union entre les phosphates des États du Levant et ceux de la Tunisie, qui sont très riches en frustules de Diatomées et forment parfois, comme à Gafsa, de véritables tripolis phosphatisés.

Les phosphates dits suessonien⁽⁵⁾ de la Tunisie et de l'Est algérien sont bien différents des autres. Les grains de phosphate ne s'apparentent plus, comme dans les phosphates du Nord de la France, aux oolithes; ce ne sont plus des sortes de petites concrétions formées autour d'un noyau organique, dans l'espèce un Foraminifère. Ils représentent de très petites portions d'une vase à Diatomées marines, qui furent phosphatisées. Le mécanisme de la phosphatisation de cette vase comporte l'élimination de la quasi-totalité de la silice, et l'on est fondé à chercher, dans les frustules des Diatomées, l'origine de la silice des silex que l'on rencontre souvent dans les phosphates de la Tunisie et de l'Est algérien.

Tandis que les Diatomées sont fréquentes dans les grains de phosphate, elles font complètement défaut dans la gangue. Cette opposition montre que les matériaux phosphatés proviennent d'un milieu différent de celui où ils sont rassemblés. L'indépendance des grains de phosphate et de la gangue, qui apparaît comme un trait fondamental de l'histoire des phosphates, est particulièrement bien marquée dans les phosphates « suessonien⁽⁵⁾ » de la Tunisie et de l'Est algérien.

Enfin, les phosphates de la Tunisie et de l'Est algérien sont encore caractérisés par la présence de coprolithes, parfois très abondants, et par une imprégnation plus ou moins forte d'hydrocarbures, lesquels proviennent de la décomposition de la matière organique que contenait l'ancienne vase à Diatomées.

Il n'y a pas dans les mers actuelles de sédimentation phosphatée; les débris organiques, quelque importants qu'ils soient

(5) Le terme « suessonien », créé par d'Orbigny, a longtemps servi à désigner, dans le bassin de Paris, l'ensemble des assises éocènes inférieures au Calcaire grossier (Lutétien). Avec un sens moins précis, il a été étendu, en Algérie et en Tunisie, à un ensemble de couches éocènes, inférieures au « Numidien » (Éocène supérieur).

dans certains cas, ne s'y trouvent pas en quantité suffisante pour donner naissance à des concentrations d'acide phosphorique comparables à celles que l'on rencontre dans les formations géologiques.

Comme pour le fer, la source première de l'acide phosphorique des phosphates de chaux sédimentaires se trouve dans les roches qui forment les masses continentales et, en dernière analyse, dans les roches cristallines. Les organismes marins, animaux et végétaux, l'empruntent à la mer, pour le fixer dans leurs tissus, et le restituent, après leur mort, au monde minéral.

Le phosphate de chaux se rencontre dans toutes les roches sédimentaires d'origine marine, mais le plus souvent en très petite quantité. Lorsqu'il abonde, au point de constituer des gîtes exploitables, on doit chercher la cause de sa concentration dans des perturbations profondes, jetées brusquement dans les conditions d'existence des organismes par les grandes ruptures d'équilibre, comme de soudains exhaussements du fond des mers, de brusques transgressions et régressions, etc.

Ces troubles profonds, auxquels L. Cayeux fait appel pour expliquer non seulement la genèse des gîtes de phosphate de chaux sédimentaires et des gîtes de minerai de fer oolithique, mais aussi la formation des silex, le remaniement des couches en voie de dépôt, la dolomitisation massive de certains calcaires (craie du bassin de Paris, calcaires dinantiens du massif primaire gallo-belge), etc., — ces troubles sont des phénomènes qu'on ne voit nulle part à l'œuvre dans les océans actuels. Les effets auxquels ils aboutissent sont aujourd'hui inconnus dans les mers. Aussi, à côté de la théorie des Causes actuelles de Ch. Lyell, qui eut, au XIX^e siècle, un légitime succès, convient-il de réserver une nouvelle place à des causes anciennes qui ne jouent plus aujourd'hui [283].

*
* *

Parmi les minéraux qui entrent dans la constitution des roches sédimentaires, crétacées et tertiaires de France, la glauconie est l'un des plus importants. Elle est très répandue dans certaines assises crétacées et tertiaires du Nord de la France et de la Belgique, et L. Cayeux en a fait, à diverses reprises, une étude approfondie. Il en a décrit les multiples manières d'être et en a retracé l'histoire [42, 62, 190, 234].

Ce minéral est particulièrement abondant, aux environs de Mons, dans les formations vraconniennes (assises inférieure et moyenne d'Harchies, meule de Bracquagnies) et dans le Cénomanién supérieur (« Tourtia » de Mons). C'est pour certaines de ces roches, et spécialement pour des roches du Tourtia de Mons, que L. Cayeux a proposé le nom de « glauconite » [190]. Les glauconites sont des roches vertes, pétries de glauconie. Les unes sont des glauconites par leurs minéraux seulement; les autres, par les minéraux et par la gangue. Les premières sont des glauconites typiques; la glauconie s'y trouve en grains bien individualisés. Les autres sont des glauconites dont le ciment, primitivement calcaire, a été épigénisé par de la glauconie.

Quant à l'origine même de la glauconie, elle serait, pour Cayeux, l'œuvre de phénomènes biochimiques, déclenchés par l'activité bactérienne.

*
**

L. Cayeux a étendu aux terres arables [84, 85, 90] et à l'ergeron de la région parisienne [200] les méthodes d'analyse auxquelles il avait soumis les roches sédimentaires. Il reconnut, dans l'ergeron, une formation éolienne, appartenant à la catégorie des lœss typiques, et dont les éléments furent fournis par la craie turonienne et probablement aussi par la craie cénomaniénne de la bordure du bassin de Paris.

Enfin, en précisant les caractères des sables éoliens et en signalant la grande diversité des sables des dunes sahariennes [207], Cayeux a soulevé le problème que posent la genèse de ces dunes et l'histoire de leurs éléments.

LES PREMIÈRES MANIFESTATIONS DE LA VIE :

LES FOSSILES PRÉCAMBRIENS.

De bonne heure, la fréquence, parmi les éléments qui constituent les roches sédimentaires, des microorganismes et de débris microscopiques d'organismes plus volumineux incita L. Cayeux à soumettre à l'analyse microscopique des roches sédimentaires très anciennes, réputées azoïques. C'est ainsi qu'il découvrit, dans des phanites du massif armoricain alors

attribués au Précambrien (*), toute une microfaune constituée essentiellement par des organismes qu'il rapporta aux Radio-laires [46]. A ceux-ci sont associés des Foraminifères [47] et de petits corps qu'il considéra comme des spicules d'Éponges [50 et 50 bis].

Cette découverte souleva à l'époque d'ardentes controverses, auxquelles mirent fin des observations faites dans l'Algonkien de la région des grands lacs américains. Cayeux reconnut là, dans des minerais de fer huroniens (algonkiens), de nombreux restes d'Encrines, qui font supposer que la vie est apparue à la surface du globe à une époque même antérieure au Précambrien [121].

ÉTUDES STRATIGRAPHIQUES EN FRANCE.

Pendant de nombreuses années, de 1888 à 1913, L. Cayeux mena de front ses travaux sur la pétrographie des roches sédimentaires et des études stratigraphiques en France et dans la Méditerranée orientale.

La participation de L. Cayeux à l'étude stratigraphique du sous-sol français intéresse surtout la région du Nord. C'est dans cette région qu'il fit, sous la direction de J. Gosselet, son apprentissage du métier de géologue, et c'est sur le Crétacé de la région lilloise qu'ont porté ses premières publications.

Parmi ses travaux de jeunesse figure une note sur le Crétacé des environs de Tournai [7] que visitent surtout les géologues lillois. A la carrière classique du Cornet, à Chercq, le calcaire carbonifère est creusé de poches de décalcification, dans lesquelles sont parfois descendus des dépôts wealdiens, et sur le tout — sur le calcaire carbonifère et sur le remplissage des poches — s'étale le Crétacé marin. Celui-ci débute par un conglomérat — le célèbre « Tourtia de Tournai » — connu par la richesse et la belle conservation de sa faune. Un ensemble de marnes lui succèdent. Celles de la partie supérieure, sur lesquelles repose le tuffeau landénien, sont bien datées par la présence de *Terebratulina rigida* (*T. gracilis* auct.). Entre le tourtia de Tournai et les marnes à *T. rigida*, L. Cayeux a

(*) Ces phthanites sont intercalés dans les schistes de Lamballe, dont l'âge précambrien vient d'être contesté, et qui seraient peut-être un peu plus récents. Des débris de phthanite sont remaniés dans le Poudingue de Gourin, lequel serait, d'après une étude récente de Ch. Barrois et P. Pruvost, l'équivalent du « Conglomérat pourpré » et formerait la base de l'Acadien.

distingué deux très minces assises : 1° une assise inférieure, marneuse, chargée de galets, riche en fossiles souvent usés, parmi lesquels se trouve *Actinocamax plenus*; 2° une marne dure, ne renfermant que de rares organismes, insuffisants pour en préciser l'âge. L'assise à *Actinocamax plenus* ravine, en certains points, le tourtia de Tournai et repose alors directement sur le calcaire carbonifère ou sur le Wealdien des poches de décalcification. Elle peut, elle-même, être ravinée par la marne dure, qui succède alors directement au tourtia de Tournai.

L. Cayeux a dressé la liste des fossiles recueillis dans l'assise à *A. plenus* : elle comprend, avec des espèces qui paraissent être propres à cette assise, de nombreux fossiles remaniés du tourtia de Tournai et du calcaire carbonifère.

A l'époque où débutait Cayeux, J. Gosselet achevait la publication des petites monographies géologiques qu'il a consacrées à divers cantons du sud du département du Nord et du nord du département de l'Aisne. L. Cayeux écrivit celle du canton d'Avesnes-Nord, dont il était originaire [12].

Puis, en collaboration avec J. Gosselet, il prépara, pour la Carte géologique détaillée de la France au 80.000^e, la deuxième édition des Feuilles de Cambrai, d'Amiens et de Lille. Plus spécialement chargé de la revision des levés des terrains crétacés, il distingua nettement, sur la Feuille de Cambrai, dans le complexe que la première édition désignait sous le nom de « craie blanche noduleuse », deux assises bien différentes : 1° une assise turonienne, à *Micraster Leskei* (*M. breviporus* auct.), qui comprend elle-même deux sous-assises : la craie blanche à silix et la craie grise, riche en fossiles; 2° une assise sénonienne, à *M. decipiens* (*M. cor testudinarium* auct.), autrement dit le Coniacien.

L. Cayeux s'attacha spécialement à l'étude de la craie grise, turonienne. Il en fit connaître les variations de facies et dressa une liste des fossiles qu'elle lui avait livrés [16].

Il s'appliqua aussi à préciser les caractères de plusieurs espèces de *Micraster*, dont le rôle est essentiel dans l'analyse stratigraphique des craies du Nord de la France. Il distingua, chez *M. Leskei*, deux formes principales. L'une, relativement petite, étroite et basse, est la forme habituelle de la craie blanche à silix. L'autre est la forme type de l'espèce; on la rencontre surtout dans la craie grise.

Cayeux décrit encore [19], sous le nom de *M. Gosseleti*, un *Micraster* globuleux, de grande taille, dont les quelques exemplaires connus proviennent de la craie à *M. decipiens*.

Enfin, au Sud de Péronne, à la limite des Feuilles géologiques de Cambrai et de Laon, il reconnut la zone à *Marsupites*, qui forme le sommet du Santonien [20].

Dans l'histoire des progrès de nos connaissances sur les terrains tertiaires du bassin franco-belge, deux observations intéressantes de L. Cayeux méritent particulièrement d'être retenues. L'une concerne le Landénien continental de la région parisienne; l'autre, l'Yprésien de la Flandre.

Le Landénien continental du bassin de Paris — le « Sparnacien » des géologues parisiens — se présente sous deux facies :

Au Nord, dans une partie du Vermandois et du Laonnais, dans le Noyonnais, le Soissonnais, le Valois et le Tardenois, règne le facies des argiles à lignites : dans la formation, essentiellement argileuse, s'intercalent des lits de lignite, les « Lignites du Soissonnais ». Dans son ensemble, la faune des argiles à lignites est lagunaire, et parmi ses éléments les plus communs et les plus caractéristiques se trouve *Cyrena cuneiformis*.

Au Sud, la formation devient plus continentale, et les lits de lignite se réduisent ou font défaut; c'est la formation de l'« Argile plastique ». Sa faune est pauvre. Elle comprend des Mollusques dulcicoles, des Poissons d'eau douce (*Lepidosteus*), des Crocodiles, des Oiseaux (*Gastornis*) et des Mammifères (*Coryphodon*, *Pachyæna*) qui, pour la plupart, ont été rencontrés, aux environs de Paris, à la base de la formation.

Dans la région parisienne, un niveau de sables — les Sables d'Auteuil — s'intercale dans la masse argileuse. En signalant, dans les rognons pyritifères dont sont chargés les sables d'Auteuil, la présence de *Cyrena cuneiformis* [86], L. Cayeux a souligné l'étroite liaison des deux facies.

Si l'on néglige les microorganismes, la puissante Argile des Flandres (ou Argile d'Ypres) apparaît comme une formation très pauvre en fossiles. Des niveaux fossilifères n'y sont effectivement rencontrés que de loin en loin.

L'étude des échantillons des couches traversées par un forage exécuté à Hazebrouck, dans la Flandre française, permit à

Cayeux [23] (7) de signaler, dans la partie supérieure de l'argile yprésienne, deux niveaux fossilifères, qui lui livrèrent, entre autres espèces, *Nummulites planulatus* et *Turritella Solanderi* (*T. edita* auct.).

Aussi longtemps que ses fonctions le retinrent à Lille, L. Cayeux concentra son activité scientifique sur la géologie du Nord de la France. Parti de Lille, il alla faire ailleurs œuvre de stratigraphe : en France, dans les Cévennes calcaires; à l'étranger, dans la Méditerranée orientale.

Dans les Cévennes calcaires, aux confins des départements de l'Ardèche et du Gard, il explora, pour la Carte géologique de la France au 80.000^e, la région nord-est de la Feuille d'Alès (Alais), qui restait à lever. Il fixa, dans cette partie des Cévennes calcaires, l'échelle des terrains depuis le Trias jusqu'au Tertiaire inclus.

ÉTUDES GÉOLOGIQUES DANS LA MÉDITERRANÉE ORIENTALE.

PÉLOPONÈSE ET ÎLE DE CRÈTE. — De 1901 à 1914, L. Cayeux fut chargé, par le Ministère de l'Instruction publique, de missions scientifiques dans la Méditerranée orientale : en Grèce continentale, dans l'Archipel et en Crète.

Dans le Péloponèse, il confirme l'existence du Trias pélagique et du Jurassique supérieur. Il introduit un terme nouveau dans l'échelle stratigraphique de la région : l'« Infracrétacé », dont la présence est révélée par une faune hauterivienne et par une faune probablement barrémienne.

La constitution géologique de l'île de Crète n'est que fort incomplètement connue lorsque Cayeux en aborde l'étude. On sait seulement, par les travaux de Raulin, que sur un complexe très épais, rapporté au « terrain primitif », repose une puissante série de terrains lithologiquement très variés, attribués au Crétacé, malgré l'absence de documents paléontologiques. Du

(7) Dans la coupe du forage dressée par Cayeux [23, p. 273], le niveau fossilifère le plus élevé est attribué au Panisélien. Le Panisélien, qui, à l'époque où écrivait Cayeux, était considéré comme un étage indépendant de l'Yprésien et du Lutétien, est en réalité un complexe, qui comprend une partie inférieure, yprésienne, et une partie supérieure, lutétienne. Le « Panisélien » du forage d'Hazebrouck appartient à l'Yprésien. Voir M. LERICHE, Les rapports entre les formations tertiaires du bassin de Paris et du bassin belge (*Bull. Soc. belge de Géol., de Paléontol. et d'Hydrog.*, t. XLVII, 1937, p. 577, note infrapaginale 3; 1939).

Crétacé, on passerait insensiblement au Nummulitique. A ce dernier succèdent les « terrains tertiaires subapennins » (néogènes).

Les fossiles que Cayeux parvient à découvrir dans les terrains rapportés au Crétacé lui permettent de mettre en évidence l'existence, en Crète, du Jurassique supérieur et de l'Infra-crétacé. Mais la puissance de la partie comprise entre le soulèvement métamorphique — le soi-disant « terrain primitif » — et le Jurassique supérieur reste encore telle qu'il y a place pour le Jurassique inférieur et le Jurassique moyen.

Les « terrains tertiaires subapennins » sont formés, dans l'île de Crète, d'un ensemble de sédiments marins, lagunaires et lacustres. Ils débutent par l'Helvétien et se continuent par une épaisse série de couches variées, qui se rapportent au Tortonien. Mais la liaison entre l'Helvétien et le Tortonien est si étroite qu'on doit considérer le Tortonien comme un facies essentiellement vaseux de l'Helvétien. Les deux formations, l'Helvétien et le Tortonien, ne constituent donc qu'un seul étage, le Vindobonien, conformément aux vues qu'avait exposées Ch. Depéret.

La fin du Vindobonien est marquée, dans l'île de Crète, par un retrait de la mer. A l'époque pontienne (sahélienne), la mer reprend possession du terrain perdu et s'étend même au delà de la limite atteinte par la mer vindobonienne. Elle dépose des calcaires à *Lithothamnium*.

Le Plaisancien, lui-même transgressif, forme le sommet des « terrains tertiaires subapennins » de l'île de Crète.

En signalant la présence du Sahélien dans l'île de Crète, L. Cayeux a montré que la mer sahélienne, que l'on croyait limitée à la partie sud de la Méditerranée occidentale, avait recouvert toute la Méditerranée méridionale.

Des superpositions anormales révèlent, en Crète, l'existence de phénomènes de charriage [78]. En de nombreux points, les terrains jurassique et infra-crétacé surmontent les calcaires à Rudistes du Crétacé supérieur et le Nummulitique.

Enfin, l'intérêt de l'île est encore rehaussé par l'activité volcanique dont elle fut le théâtre aux temps secondaires, c'est-à-dire à une époque qui, en ce qui concerne le volcanisme, fut, pour presque toute l'Europe, une période de tranquillité [79].

Les matériaux que L. Cayeux a ramenés de ses missions dans le Péloponèse et en Crète sont considérables et n'ont été

qu'incomplètement mis en œuvre. Les publications qu'il a consacrées à la géologie de ces deux régions ne sont que des notes préliminaires, qui devaient être suivies d'une description géologique détaillée de l'île de Crète et de plusieurs monographies destinées à faire connaître les faunes crétacée et tertiaire de la Méditerranée orientale. Ce n'est pas sans un très vif regret qu'il dut, arrivé en fin de carrière, renoncer à la réalisation d'un vaste projet formé dans l'enthousiasme de la jeunesse.

DÉLOS. — A plusieurs reprises, l'Ecole française d'Athènes a exécuté à Délos, dans les Cyclades, des fouilles archéologiques qui ont mis en lumière la splendeur passée de cet îlot rocheux, couvert de ruines et aujourd'hui inhabité. L'exploration de Délos fut poussée activement au début du siècle, grâce aux libéralités du duc de Loubat. Estimant que la connaissance approfondie du site était nécessaire pour expliquer l'histoire humaine de Délos, les promoteurs de cette campagne de fouilles s'étaient adressés à L. Cayeux, qui explora minutieusement l'îlot.

La monographie que Cayeux a écrite sur la géologie de Délos forme, dans la collection des mémoires consacrés à l'exploration de l'îlot, un magnifique volume abondamment et richement illustré [122].

L'îlot de Délos est formé presque uniquement de granites et de gneiss. A ces derniers sont subordonnés des cipolins. Toutes ces roches sont étudiées en grand détail par Cayeux. Il en est de même des effets de l'érosion atmosphérique et de l'érosion marine sur les granites et sur les gneiss.

Les terrains sédimentaires, non métamorphiques, sont représentés, à l'intérieur de Délos, par des « poros » et par des alluvions fluviales. Des dépôts de plages récents, en général fort peu étendus, sont conservés au fond des baies.

Les « poros » sont des calcaires grossiers, — d'anciens sables calcaires plus ou moins endurcis, — gris ou jaunes. Les uns sont lacustres; les autres, d'origine marine, sont constitués, en partie, par des débris d'organismes, en particulier d'Algues calcaires. Les uns et les autres appartiennent probablement au Pliocène supérieur. Ils ne forment, à Délos, que quelques petits lambeaux.

Les alluvions fluviales, dans lesquelles ont pénétré les fouilles archéologiques, ont livré une dent d'*Elephas antiquus*. Or, l'extrême exigüité de Délos ne permet pas de croire que

cet éléphant ait pu vivre dans un domaine aussi restreint. L'îlot de Délos et, avec lui, toutes les Cyclades devaient être rattachés au Continent au début du Quaternaire.

A propos de Délos, L. Cayeux montra la fixité du niveau de la Méditerranée depuis l'Antiquité. Il fit aussi ressortir l'aide que peut apporter la géologie dans la résolution des problèmes que posent parfois les fouilles archéologiques. Contrairement au dire de tous les voyageurs qui avaient visité l'île de Délos et l'avaient décrite comme une terre privée d'eau, il reconnut l'existence d'une nappe aquifère, à laquelle s'alimentaient les puits de l'antique cité.

La haute tenue des travaux de Lucien Cayeux fut vite remarquée, et de nombreuses distinctions vinrent en consacrer la valeur : le prix Kuhlmann (Société des Sciences, de l'Agriculture et des Arts de Lille), en 1890; le prix Vaillant (Académie des Sciences), en 1898, qui couronna sa thèse de doctorat, laquelle répondait à une question mise au concours; le prix Fontannes (Société géologique de France), en 1905; le prix Gosselet (Société des Sciences... de Lille), en 1910; le prix Barbié du Bocage (Société de Géographie), en 1913; le prix Gosselet (Société géologique de France), en 1917; le Grand prix des Sciences physiques (Académie des Sciences), en 1923; le prix Albert Gaudry (Société géologique de France), en 1932; le prix Paul Fourmarier (Académie des Sciences, des Lettres et des Beaux-Arts de Belgique, Classe des Sciences), dont il fut, en 1938, le premier lauréat; la médaille Trasenster (Association des Ingénieurs sortis de l'Ecole de Liège).

L. Cayeux fut, à deux reprises, en 1907 et en 1935, président de la Société géologique de France; président de la Société française de Minéralogie, en 1923. De nombreuses Sociétés scientifiques étrangères se l'attachèrent en qualité de membre honoraire, en particulier la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie, et la Société géologique de Belgique.

Il fut élu membre titulaire de l'Académie d'Agriculture de France en 1917, membre de l'Institut en 1928. Il présida l'Académie d'Agriculture en 1933.

Plusieurs Académies étrangères l'associèrent à leur compagnie : l'Académie des Sciences de Russie, à titre de membre correspondant (1925); l'Académie royale de Roumanie, en qualité de membre d'honneur (1936).

L. Cayeux était docteur *honoris causa* des Universités de Louvain (1929) et de Liège (1930). A l'occasion du centenaire de sa fondation, l'Université de Bruxelles lui décerna le même titre, en 1934.

Parallèlement aux distinctions que lui valut son œuvre scientifique, les honneurs officiels marquèrent les étapes de sa carrière. L. Cayeux était Officier de la Légion d'Honneur, Officier du Mérite agricole, Commandeur de l'Ordre de Léopold II, Officier de l'Ordre du Christ de Portugal.

*
**

L'homme dont je viens de parcourir le vaste champ d'activité était d'une taille au-dessus de la moyenne. Dans les assemblées, sa silhouette, élancée, se détachait des groupes. Son visage, aux traits réguliers, portait les signes distinctifs de l'Ardenais : la volonté et l'énergie. Son regard clair reflétait la franchise et la droiture. Sa mise était soignée, élégante même. Il avait le goût des belles choses. La plupart de ses grands ouvrages ont paru dans la magnifique collection des « Mémoires de la Carte géologique de la France ». L'un d'eux — le mémoire sur les « Roches carbonatées » — fut publié sous les auspices de la Fondation Singer-Polignac. Le mémoire sur « Délos », que fit paraître l'Ecole française d'Athènes, est une publication de grand luxe, faite, comme l'exploration archéologique de l'île, grâce à la munificence du duc de Loubat. Tous ces mémoires sont abondamment et magnifiquement illustrés.

Cayeux était accueillant; il s'avancait vers ses visiteurs, la main tendue, un fin sourire aux lèvres. Sa serviabilité était extrême; il initiait volontiers les jeunes à ses recherches, les encourageait et les aidait de son expérience. Son dévouement était sans bornes; s'il acceptait une charge nouvelle, il la remplissait avec une grande conscience, son travail personnel dût-il en souffrir. Il fit partie de nombreuses commissions, en présida plusieurs. A toutes il apporta un concours actif.

Cayeux était parvenu à se constituer une importante bibliothèque qui, ne pouvant plus trouver place dans son appartement parisien, était en partie conservée à Semousies, où le ramenait, chaque année, la nostalgie de sa jeunesse. Pendant la guerre de 1914-1918, la maison de Semousies fut pillée, et la bibliothèque dispersée. C'est alors qu'il acquit sa propriété du Bois Blot, à Mauves, sur les coteaux que borde la Loire nantaise. Après sa mise à la retraite, ses séjours s'y firent plus

fréquents et plus longs, mais il continua d'y travailler sans relâche. Repris par la vie rurale du pays natal, il chercha son délassement dans l'exploitation du domaine où la vigne remplaçait le verger d'autrefois.

C'est là que je le revis pour la dernière fois, aux jours sombres du radieux printemps de 1940. Dans ces jours de deuil, où tout semblait fini, il se rendit compte, bien vite, que tout n'était pas perdu. Encore tout étourdi des coups assésés à notre patrie, il se réfugia dans le travail. Il publia la deuxième partie de son mémoire sur les « Phosphates de chaux sédimentaires », ainsi que l'attachant opuscule dans lequel sont exposées les vues synthétiques qui devaient faire l'objet de sa dernière année d'enseignement au Collège de France.

Faisant violence à ses goûts, il accepta, sur la prière instante de ses compatriotes, une charge administrative absorbante, lourde de responsabilités, qui ne lui permit pas d'achever complètement la troisième et dernière partie de son grand ouvrage sur les « Phosphates ». Là encore, il se dépensa au delà de toute mesure. Ce n'est pas sans un serrement de cœur qu'il dut suspendre son travail scientifique, car à aucun moment ne faiblit son enthousiasme pour les études auxquelles il avait consacré plus d'un demi-siècle : pareil à celui qui ne cessa d'animer notre vieux Maître de Lille, son enthousiasme ne finit qu'avec la vie.

LISTE DES PUBLICATIONS DE LUCIEN CAYEUX ⁽⁸⁾.

ABRÉVIATIONS :

- A.C.F. Annuaire du Collège de France.
 A.F.A.S. Association française pour l'Avancement des Sciences.
 A.G. Annales de Géographie.
 A.M. Annales des Mines.
 A.S.A.E. Annales du Service des Antiquités de l'Égypte.

(8) Autant que possible, j'ai conservé dans cette liste le numérotage des listes dressées par L. CAYEUX en 1914 et en 1927 (*Notice sur les travaux scientifiques de Lucien Cayeux*, 1914; *Supplément*, 1927; n^{os} 145 et 203 de la présente liste). Quelques publications sont introduites ici sous des numéros *bis* et *ter*.

- A.S.A.M.* Annals of the South African Museum.
A.S.G.N. Annales de la Société géologique du Nord.
B.S.B.G.P.H. Bulletin de la Société belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie.
B.S.C.G.F. ... Bulletin des Services de la Carte géologique de la France.
B.S.F.M. Bulletin de la Société française de Minéralogie.
B.S.G.F. Bulletin de la Société géologique de France.
B.S.Ph.P. ... Bulletin de la Société philomatique de Paris.
C.R.A.A. Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie d'Agriculture de France.
C.R.A.S. Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences.
C.R.C.G.I. ... Compte rendu du Congrès géologique international.
C.R.S.S.G.F... Compte rendu sommaire des séances de la Société géologique de France.
E.G.M.F. Étude des Gîtes minéraux de la France.
M.E.C.G.F. .. Mémoires pour servir à l'explication de la Carte géologique détaillée de la France.
M.P. Le Micrographe préparateur.
M.S.G.N. Mémoires de la Société géologique du Nord.
R.E.A. Revue de l'École d'Anthropologie de Paris.
R.G.S. Revue générale des Sciences pures et appliquées.
R.I.M. Revue de l'Industrie minérale.
R.M. Revue de Métallurgie.
R.S. Revue scientifique.
R.U.M. Revue universelle des Mines.
R.V. Revue de Viticulture.
S.G.B. Société géologique de Belgique. Livre jubilaire (cinquantième anniversaire).
T.C.E. Travaux du Comité d'études. Section géologique.

 1887

1. Compte rendu de l'excursion de la Société géologique du Nord à Lezennes et Cysoing (*A.S.G.N.*, t. XIV, 1886-1887, pp. 239-247).

1888

2. *Ammonites bplex* de grande taille du grès portlandien de Winille (Boulonnais) (*A.S.G.N.*, t. XV, 1887-1888, p. 162).
3. Compte rendu de l'excursion géologique faite dans le Boulonnais, par les élèves de la Faculté des Sciences de Lille, sous la direction de M. Gosselet (*A.S.G.N.*, t. XV, pp. 319-341).

4. « Grès » dit « Porphyre » de Gognies-Chaussée (A.S.G.N., t. XVI, 1888-1889, pp. 21-25).
5. L'âge des sables de Cerfontaine et de Rousies (A.S.G.N., t. XVI, pp. 57-60).

1889

6. La Faune du Tun. Extension en épaisseur de la zone à *Micraster breviporus* (A.S.G.N., t. XVI, pp. 123-131).
7. Notes sur le Crétacé de Chercq, près Tournay (A.S.G.N., t. XVI, pp. 142-156).
8. Forages de Roubaix, Tourcoing, Wattrelos et Roncq (A.S.G.N., t. XVI, pp. 156, 358-363).
9. Nature et origine des phosphates de chaux d'après R.-A.-F. Penrose (A.S.G.N., t. XVI, pp. 157-181).
10. Compte rendu de l'excursion faite par la Société géologique du Nord à Pernes-en-Artois, le 7 avril 1889 (A.S.G.N., t. XVI, pp. 185-202; en collaboration avec J. Ladrière).
11. Compte rendu de l'excursion de la Société géologique du Nord dans les environs de Mons, le 2 juin 1889 (A.S.G.N., t. XVI, pp. 254-269).
12. Description géologique du canton d'Avesnes-Nord (A.S.G.N., t. XVI, pp. 280-339).
- 12^{bis}. Présentation d'un envoi de fossiles de M. Dharvent, de Saint-Pol (A.S.G.N., t. XVI, pp. 340-341).
13. Un cas de stratification entrecroisée des limons, à Cysoing (A.S.G.N., t. XVI, pp. 343-344).
14. Structure de la bande de calcaire carbonifère de Taisnières-sur-Helpe (A.S.G.N., t. XVI, pp. 344-352).

1890

15. Ondulations de la craie de la feuille de Cambrai et rapports de la structure ondulée avec le système hydrographique de cette carte (A.S.G.N., t. XVII, 1889-1890, pp. 71-90, pl. I et II).
16. Mémoire sur la « Craie grise » du Nord de la France (A.S.G.N., t. XVII, pp. 105-141, pl. III).
17. Découverte de silex taillés à Quiévy (Nord). Note sur leur gisement (A.S.G.N., t. XVII, pp. 151-155).
18. De la composition de quelques craies pseudo-dolomitiques du Nord de la France [C.R.A.S., t. 110 (1890-I), pp. 304-305].
19. Note sur le *Micraster Gosseleti*, espèce nouvelle de la craie blanche des environs de Lille (A.S.G.N., t. XVII, pp. 180-183, pl. IV).
20. Coup-d'œil sur la composition du Crétacé des environs de Péronne (A.S.G.N., t. XVII, pp. 227-245).
21. Excursion de la Société géologique du Nord dans les environs du Cateau. Étude des phosphates du Cambrésis (A.S.G.N., t. XVII, pp. 246-252; en collaboration avec J. Ladrière).

22. Excursion annuelle de la Société géologique du Nord à Cassel, le 1^{er} juin 1890. Vingt-cinquième anniversaire de la 1^{re} excursion géologique dirigée par M. Gosselet (*A.S.G.N.*, t. XVII, pp. 253-261).
23. Forage de la ville d'Hazebrouck. Nouveaux documents sur la faune de l'Argile des Flandres (*A.S.G.N.*, t. XVII, pp. 272-283).
24. Compte rendu de l'excursion de la Société géologique du Nord dans les environs d'Avesnes-sur-Helpe (*A.S.G.N.*, t. XVII, pp. 283-295).
25. Etude micrographique de la craie des environs de Lille. Dièves à *Inoceramus labiatus* (*A.S.G.N.*, t. XVII, pp. 342-381, pl. V).

1891

26. Observations sur la nature des minéraux signalés par M. Henri Lasne dans la craie sénonienne des environs de Doullens (*A.S.G.N.*, t. XVIII, 1890, pp. 168-170).
27. Etude comparée des résidus de craies à *Terebratulina gracilis* et à *Micraster breviporus* des environs de Lille (le titre seul) (*A.S.G.N.*, t. XIX, 1891, p. 9).
28. Sur l'existence d'un gisement de blende et de galène dans le département du Nord (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 89-90).
29. Etude micrographique du tuffeau à *Cyprina planata* du Nord de la France et de la Belgique. Du rôle des Diatomées dans la formation de ce tuffeau (note préliminaire) (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 90-95).
- 29^{bis}. De l'existence des Diatomées dans le Landénien inférieur du Nord de la France et de la Belgique [*C.R.A.S.*, t. 112 (1891-I), p. 969].
30. La craie du Nord de la France et la boue à Globigérines (note préliminaire) (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 95-102).
31. Structure du grès de Belleu (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 111-112).
32. De l'existence des Diatomées dans l'Yprésien du Nord (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 131-132).
33. Diffusion des trois formes distinctes de l'oxyde de titane dans le Crétacé du Nord de la France [*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 132-134; *C.R.A.S.*, t. 112 (1891-I), pp. 1279-1280].
34. Compte rendu de la réunion annuelle extraordinaire de la Société géologique du Nord à Cambrai, le 28 juin 1891 (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 237-251).
35. La craie du Nord est bien un dépôt terrigène (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 252-260).
36. Sur un calcaire moderne concrétionné avec Diatomées de Saint-Nectaire-le-Bas (Puy-de-Dôme) (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 260-261).
37. Particularité que présente une craie phosphatée à *Micraster* de la Somme (*A.S.G.N.*, t. XIX, p. 263).
38. Composition minéralogique des sables glauconieux landéniens du Nord de la France (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 264-265).

1892

39. Réponse aux observations de M. de Lapparent sur la nature terrigène de la craie du Nord (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 306-307).
40. De l'existence de nombreux Radiolaires dans le Jurassique et dans l'Eocène du Nord de la France. Origine probable de la silice de la gaize et des tuffeaux éocènes (*A.S.G.N.*, t. XIX, pp. 309-315).
41. Sur la présence de nombreuses Diatomées dans les gaizes crétacées du bassin de Paris [*C.R.A.S.*, t. 114 (1892-I), pp. 375-377].
- 41^{bis}. Sur la présence de nombreuses Diatomées dans les gaizes jurassiques et crétacées du bassin de Paris. De l'existence de Radiolaires dans les gaizes crétacées de ce même bassin (*A.S.G.N.*, t. XX, 1892, pp. 57-60).

1893

42. Notes sur la glauconie (*A.S.G.N.*, t. XX, pp. 381-389).
43. Notice explicative de la feuille géologique de Cambrai, au 80.000^e, 2^e édition (en collaboration avec J. Gosselet).
44. Examen micrographique des phosphates de la Somme (*M.P.*, 1893, pp. 54-58, 71-74).

1894

45. Dualité d'origine des brèches du Carbonifère franco-belge (*A.S.G.N.*, t. XXII, 1894, pp. 94-100).
46. Les preuves de l'existence d'organismes dans le terrain précambrien. Première note sur les Radiolaires précambriens (*B.S.G.F.*, 3^e série, t. XXII, 1894, pp. 197-228, pl. XI).
47. Sur la présence de restes de Foraminifères dans les terrains précambriens de Bretagne [*C.R.A.S.*, t. 118 (1894-I), pp. 1433-1435; *A.S.G.N.*, t. XXII, pp. 116-119].

1895

48. Note sur les couches tertiaires de la feuille d'Amiens (*A.S.G.N.*, t. XXII, pp. 150-163; en collaboration avec J. Gosselet).
49. Crétacé de la feuille d'Amiens (Revision) [*B.S.C.G.F.* (t. VI), n^o 38 (Comptes rendus des collaborateurs pour la Campagne de 1893), pp. 2-3].
50. De l'existence de nombreux débris de Spongiaires dans les phanérites du Précambrien de Bretagne (*C.R.A.S.*, t. 120, pp. 279-282).
- 50^{bis}. De l'existence de nombreux débris de Spongiaires dans le Précambrien de Bretagne (*A.S.G.N.*, t. XXIII, 1895, pp. 52-65, pl. I, II).
51. Composition minéralogique et structure des silex du gypse des environs de Paris [*C.R.A.S.*, t. 120 (1895-I), pp. 391-394; *A.S.G.N.*, t. XXIII, pp. 46-51].
52. Notice explicative de la feuille géologique d'Amiens au 80.000^e, 2^e édition (en collaboration avec J. Gosselet).

53. Feuille d'Alais [*B.S.C.G.F.* (t. VII), n° 44 (Comptes rendus des collaborateurs pour la Campagne de 1894), pp. 81-82].
54. Existence de nombreux cristaux de feldspath-orthose dans la craie du bassin de Paris. Preuves de leur genèse *in situ* (*C.R.A.S.*, t. 120, pp. 1068-1071).

1896

55. De l'existence de nombreux Radiolaires dans le Tithonique supérieur de l'Ardèche [*C.R.A.S.*, t. 122 (1896-I), pp. 342-343].
- 55^{bis}. De l'existence de nombreux Radiolaires dans le Tithonique supérieur de l'Ardèche (*A.S.G.N.*, t. XXIV, 1896, pp. 26-29).
56. Structure bréchoïde du Tithonique supérieur du Sud de l'Ardèche. Preuves de son origine à la fois postsédimentaire et chimique (*C.R.A.S.*, t. 122, pp. 1560-1562).
57. De l'existence de silex formés en deux temps. Conséquences au point de vue de la période de formation des silex de la craie [*A.F.A.S.*, 25^e session (Carthage-Tunis), 2^e partie (Notes et Mémoires), pp. 290-293].
58. Feuille d'Alais [*B.S.C.G.F.* (t. VIII), n° 53 (Comptes rendus des collaborateurs pour la Campagne de 1895), pp. 110-113].
59. Note préliminaire sur la constitution des phosphates de chaux suessonniens du Sud de la Tunisie [*C.R.A.S.*, t. 123 (1896-II), pp. 273-276].
60. Notice explicative de la feuille géologique de Lille au 80.000^e, 2^e édition (en collaboration avec J. Gosselet et J. Ladrière).

1897

61. Feuille d'Alais [*B.S.C.G.F.* (t. IX), n° 59 (Comptes rendus des collaborateurs pour la Campagne de 1896), pp. 93-94].
62. Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires. I. Etude de quelques dépôts siliceux, secondaires et tertiaires du bassin de Paris. II. Craie du bassin de Paris [*M.S.G.N.*, t. IV, mém. n° 2, vol. de 589 pages, 10 planches (thèse de doctorat)].
63. Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (Résumé) (*A.S.G.N.*, t. XXVI, 1897, pp. 168-187).

1898

64. Mémoire sur l'origine des minerais de fer oolithique de France [Mémoire resté inédit, mais repris dans les mémoires nos 108 et 180; couronné, avec le mémoire précédent (n° 62), par le prix Vaillant (Académie des Sciences)].

1900

65. Feuille d'Alais [*B.S.C.G.F.* (t. XI), n° 73 (Comptes rendus des collaborateurs pour la Campagne de 1899), p. 81].

1901

66. *C.R.C.G.I.*, VIII^e session, France, 1900, Compte rendu des séances, pp. 136-146, 152-160, 169-177, 180-184.
67. Etude micrographique de la craie des Alpes occidentales et des Alpes centrales *in* A. DE GROSSOUVRE, Recherches sur la Craie supérieure (*M.E.C.G.F.*, pp. 549-552, 554-557, 573-577, 585-591, 593, 594-595).
68. Note sur une série de roches du Minnesota envoyées à l'École des Mines (*A.M.*, 9^e série, t. XIX, pp. 561-562).
69. Notice explicative de la feuille géologique d'Alais au 80.000^e, 1^{re} édition (en collaboration avec G. Fabre).
70. Découverte de Goniatites dans les schistes frasniens de Givet [*A.S.G.N.*, t. XXX, 1901, p. 24 (le titre seul)].
71. Analyse micrographique des poussières atmosphériques observées à Tunis le 10 mars 1901 *in* E. BERTAINCHAND, Sur les poussières atmosphériques observées à Tunis le 10 mars 1901 [*C.R.A.S.*, t. 132 (1901-I), p. 1155].
72. Preuve de l'existence du Trias en Grèce. Posiiton stratigraphique du calcaire du Cheli [*C.R.A.S.*, t. 133 (1901-II), pp. 1254-1256; en collaboration avec Ed. Ardaillon].

1902

73. Sur la composition et l'âge des terrains métamorphiques de la Crète [*C.R.A.S.*, t. 134 (1902-I), pp. 1116-1119].
74. Sur les rapports tectoniques entre la Grèce et la Crète occidentale (*C.R.A.S.*, t. 134, pp. 1157-1159).

1903

75. Détermination de 109 genres de Radiolaires crétacés *in* S. SQUINABOL, Le Radiolarie dei Noduli selciosi nella Scaglia degli Euganei, 3 planches.
76. Existence du Crétacé inférieur en Argolide (Grèce) [*C.R.A.S.*, t. 136 (1903-I), pp. 165-166].
77. Existence du Jurassique supérieur et de l'Infracrétacé dans l'île de Crète (*C.R.A.S.*, t. 136, pp. 330-332).
78. Phénomènes de charriage dans la Méditerranée orientale (*C.R.A.S.*, t. 136, pp. 474-476).
79. Les éruptions d'âge secondaire dans l'île de Crète (*C.R.A.S.*, t. 136, pp. 519-521).
80. Sur la présence de cristaux macroscopiques d'albite dans les dolomies du Trias de la Crète (*C.R.A.S.*, t. 136, pp. 1703-1704).
81. Programme du cours de géologie appliquée à l'agriculture (25 leçons) *in* l'Institut National Agronomique de 1876 à 1901, pp. 141-153.

1904

82. Les lignes directrices des plissements de l'île de Crète (*C.R.C.G.I.*, IX^e session, Vienne, 1903, pp. 383-392).
83. Géologie des environs de Nauplie. Existence du Jurassique supérieur et de l'Infracrétacé en Argolide (Grèce) (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. IV, 1904, pp. 87-105).

1905

84. Constitution de la terre arable. Du rôle de l'analyse minéralogique dans l'analyse des terres (*R.V.*, t. XXIII, pp. 457-461, 490-497, 520-523).
85. Sur l'état de conservation des minéraux de la terre arable [*C.R.A.S.*, t. 140 (1905-I), pp. 1270-1271].
86. Existence d'une faune saumâtre dans les sables de l'argile plastique d'Issy (Seine) (*C.R.A.S.*, t. 140, pp. 1728-1729).
87. Structure d'une itacolumite très flexible du Brésil (*B.S.Ph.P.*, 9^e série, t. VII, 1905, pp. 253-254).
88. Les minéraux des eaux de sources de Paris [*C.R.A.S.*, t. 141 (1905-II), pp. 229-231].
89. La dissolution directe des silicates de la terre arable et les expériences de Daubrée (*C.R.A.S.*, t. 141, pp. 509-510).
90. Nouvelles observations critiques sur la constitution de l'analyse minéralogique de la terre arable (*R.V.*, t. XXIV, pp. 293-297).
91. Etude pétrographique des matières employées pour la fabrication des vases en pierre préhistoriques égyptiens (*R.E.A.*, 15^e année, 1905, pp. 96-100; en collaboration avec L. Capitan).

1906

92. Structure du grès de Matagne (Belgique) (*A.S.G.N.*, t. XXXIV, 1905, pp. 294-295).
93. Les concrétions phosphatées de l'Agulhas Bank, d'après le Dr L.-W. Collet. Genèse des gisements de phosphate de chaux sédimentaire (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. V, 1905, pp. 750-753).
94. Les tourbes des plages bretonnes, au Nord de Morlaix (Finistère) [*C.R.A.S.*, t. 142 (1906-I), pp. 468-470].
95. Structure et origine probable du minerai de fer magnétique de Diélette (Manche) (*C.R.A.S.*, t. 142, pp. 716-718).
96. Genèse d'un minerai de fer par décomposition de la glauconie (*C.R.A.S.*, t. 142, pp. 895-897).
97. Structure et origine des grès du Tertiaire parisien (*E.G.M.F.*, vol. de VIII+160 pp., 10 pl.).

1907

98. Structure et classification des grès et quartzites. Pluralité des origines du type quartzite (*C.R.C.G.I.*, X^e session, Mexico, 1906, pp. 1211-1222).

99. Les œufs d'Insectes des lacs de Chalco et Texcoco, des environs de Mexico, et la formation des oolithes (*C.R.C.G.I.*, X^e session, pp. 1223-1227).
100. Fixité du niveau de la Méditerranée à l'époque historique (*A.G.*, t. XVI, 1907, pp. 97-116).
101. Discours prononcé à la Société géologique de France à l'occasion de la mort de Marcel Bertrand (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. VII, 1907, pp. 42-44).
102. Examen de quelques roches employées par les Egyptiens dans la construction, dans la bijouterie et dans la confection des moules pour la fonderie de bijouterie (*A.S.A.E.*, t. VIII, pp. 116-119).

1908

103. Allocution présidentielle à la séance générale annuelle de la Société géologique de France (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. VIII, 1908, pp. 155-160).
104. Découverte de l'*Elephas antiquus* à l'île de Délos (Cyclades) [*C.R.A.S.*, t. 147 (1908-II), pp. 1089-1090].

1909

105. Observation sur l'existence d'un continent égéen au Pliocène (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. VIII, p. 543).
106. Le quartz secondaire des minerais de fer oolithique du Silurien de France et son remplacement en profondeur par du fer carbonaté [*C.R.A.S.*, t. 149 (1909-II), pp. 1095-1097].
107. Evolution minéralogique des minerais de fer oolithique primaires de France (*C.R.A.S.*, t. 149, pp. 1388-1390).
108. Les minerais de fer oolithique de France. Fascicule I : Minerais de fer primaires (*E.G.M.F.*, vol. de VIII+344 pp., 19 pl.).

1910

109. Prolongement des minerais de fer oolithique siluriens de la presque île armoricaine sous le bassin de Paris [*C.R.A.S.*, t. 150 (1910-I), pp. 134-135].
110. Les Algues calcaires du groupe des *Girvanella* et la formation des oolithes (*C.R.A.S.*, t. 150, pp. 359-362).
111. Remarque sur la genèse de minerais de fer par décomposition de la glauconie (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. X, 1910, p. 397).
112. Fouilles de Délos et les applications de la géologie à l'archéologie (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. X, pp. 404-405).
113. Présentation d'un livre de E. VAN DEN BROECK, E.-A. MARTEL et ED. RAHIR, « Les cavernes et les rivières souterraines de la Belgique, étudiées spécialement dans leurs rapports avec l'hydrologie des calcaires et avec la question des eaux potables », Bruxelles, 1910 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. X, pp. 522-523).

114. Les minerais de fer oolithique primaires de France (Résumé du mémoire n° 108) (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. X, pp. 531-540; *R.M.*, Mémoires, t. VIII, 1911, pp. 117-126).
115. Sur l'existence de calcaires phosphatés à Diatomées, au Sénégal [*C.R.A.S.*, t. 151 (1910-II), pp. 108-110].

1911

116. Existence de calcaires à Gyroporelles dans les Cyclades [*C.R.A.S.*, t. 152 (1911-I), pp. 292-293].
117. Le Miocène moyen de l'île de Crète (*C.R.A.S.*, t. 152, pp. 637-639).
118. Existence du Pontique marin dans l'île de Crète (*C.R.A.S.*, t. 152, pp. 981-984).
119. Dislocations des îles de Délos, Rhénée et Mykonos (Cyclades) (*C.R.A.S.*, t. 152, pp. 1529-1531).
120. Les transformations du massif des Cyclades à la fin des temps tertiaires et au commencement de l'époque quaternaire (*C.R.A.S.*, t. 152, pp. 1796-1798).
121. Existence de restes organiques dans les roches ferrugineuses associées aux minerais de fer huroniens des États-Unis [*C.R.A.S.*, t. 153 (1911-II), pp. 910-912].
122. Description physique de l'île de Délos (Exploration archéologique de Délos, faite par l'École française d'Athènes sous les auspices du Ministère de l'Instruction Publique et aux frais de M. le duc de Loubat, *in-folio*, t. IV, 216 pp., 5 pl. hors texte).
123. Comparaison entre les minerais de fer huroniens des États-Unis et les minerais de fer oolithique de France (*C.R.A.S.*, t. 153, pp. 1188-1190).

1912

124. La structure du bassin d'Urville (Calvados) et ses conséquences au point de vue de l'exploitabilité du minerai de fer [*C.R.A.S.*, t. 155 (1912-II), pp. 740-742].
- 124^{bis}. Structure du bassin d'Urville (Calvados) et ses conséquences au point de vue de l'exploitabilité du minerai de fer (*R.M.*, t. X, 1913, pp. 336-351).
125. Programme du cours de géologie générale à l'École des Mines (*in* Programme des cours de l'École Nationale Supérieure des Mines, pp. 73-77, Paris).

1913

126. Observation à propos d'une communication de G.-F. DOLLFUS intitulée : « Un forage au château du Bosq, près Port-en-Bessin (Calvados) » [*C.R.S.S.G.F.*, 1913 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII), p. 44].
127. Conditions dans lesquelles se fait le passage du Crétacé au Tertiaire en Grèce et dans l'île de Crète : les derniers Rudistes et les premières Nummulites [*C.R.S.S.G.F.*, 1913 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII), p. 46].

128. La chaire d'histoire naturelle des corps inorganiques du Collège de France et sa transformation en chaire de géologie (Leçon d'ouverture du cours de géologie au Collège de France, le 9 janvier 1913) (*R.S.*, 51^e année, t. I, pp. 417-432).
129. Observation sur l'enrichissement des nodules de phosphate de chaux remaniés du Sinémurien de l'Auxois [*C.R.S.S.G.F.*, 1913 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII), p. 60].
130. Les minerais de fer sédimentaires considérés dans leurs rapports avec la destruction des chaînes de montagnes [*C.R.A.S.*, t. 156 (1913-I), pp. 1185-1187].
131. Sur la genèse des minerais de fer sédimentaires (*C.R.A.S.*, t. 156, pp. 1495-1497).
132. Signification des galets de minerais inclus dans les minerais de fer hettangiens de Bourgogne (*C.R.A.S.*, t. 156, pp. 1793-1794).
133. Remarque sur la formation des grès de Fontainebleau (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII, pp. 442-443).
134. Remarques au sujet de la conférence de M. Francis Laur sur l'existence d'un grand bassin ferrifère en Belgique (*B.S.B.G.P.H.*, t. XXVII, 1913, Procès-verbaux, pp. 162-165).
135. Observations à propos de la note de M. BIGOT, « Sur la terminaison occidentale du synclinal de la Brèche-aux-Diables » [*C.R.S.S.G.F.*, 1913 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII), p. 187].
136. Observations sur la formation de certaines roches dolomitiques par les Mélobésies [*C.R.S.S.G.F.*, 1913 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIII), pp. 206-207].
137. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1912-1913 (Collège de France) (*A.C.F.*, 13^e année, pp. 34-35).

1914

138. Observations sur les minerais de fer eiféliens de l'Ardenne franco-belge [*C.R.S.S.G.F.*, 1914 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIV), pp. 28-29].
139. Observations sur le diagnostic de la dolomie et de la calcite par les colorants, et sur le rôle des Mélobésies dans la formation de la dolomie [*C.R.S.S.G.F.*, 1914 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIV), pp. 76-77].
140. Prolongement oriental de la formation ferrugineuse du synclinal de May (Calvados) [*C.R.A.S.*, t. 158 (1914-I), pp. 1292-1294].
141. Les déplacements de la mer à l'époque historique (Conférence de vulgarisation faite à l'Institut océanographique) (*R.S.*, 52^e année, t. I, pp. 577-586).
142. Existence de nombreuses traces d'Algues perforantes dans les minerais de fer oolithique de France (*C.R.A.S.*, t. 158, pp. 1539-1541).
143. Observation au sujet de la note de E. KERFORNE, « Sur la géologie de la partie occidentale du synclinal d'Urville (Calvados) et sa fermeture sous la forêt de Cinglais et la commune de Barbéry » [*C.R.S.S.G.F.*, 1914 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIV), p. 93].
144. Raspail, inventeur de la microchimie (*R.S.*, 52^e année, t. I, pp. 776-778).

145. Notice sur les travaux scientifiques de M. Lucien Cayeux (petit in-4°, 104 pp., Imprimerie Protat Frères, Mâcon).
146. Prolongement oriental de la formation ferrugineuse du bassin de May (Calvados) [*C.R.S.S.G.F.*, 1914 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIV), pp. 79-80].
147. Sur la présence d'Algues perforantes dans les minerais de fer oolithique de France (*C.R.S.S.G.F.*, 1914, p. 131).
148. Observation au sujet d'une note de M. J. BERGERON, sur le soufre natif rencontré dans les carrières de « petit granite » de Soignies (Belgique) (*C.R.S.S.G.F.*, 1914, p. 149).
149. Observation au sujet d'une note de M. G.-F. DOLLFUS, « Paléontologie du voyage de M. Abendanon à l'île Célèbes (*C.R.S.S.G.F.*, 1914, p. 183).
150. Auguste Michel-Lévy. Notice (*A.C.F.*, 14^e et 15^e années, pp. 17-39).

1915

151. Résumé du cours de géologie des années scolaires 1913-1914 et 1914-1915 (Collège de France) (*A.C.F.*, 14^e et 15^e années, pp. 76-77).
152. Observation au sujet de la prétendue association de Rudistes et de Nummulites en Grèce [*C.R.S.S.G.F.*, 1915 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XV), pp. 92-93].

1916

153. Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires (*M.E.C.G.F.*, 1 vol. texte, VIII+524 pp.; 1 vol. atlas, 56 pl.).
154. Examen micrographique du calcaire pisolithique et du calcaire en cordons, subordonnés aux marnes strontianifères de Sèvres [*C.R.S.S.G.F.*, 1916 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XVI), p. 103].
155. Caractères morphologiques et minéralogiques des sables des dunes de Gascogne (*C.R.S.S.G.F.*, 1916, pp. 116-117).
156. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1915-1916 (Collège de France) (*A.C.F.*, 16^e année, pp. 47-48).
157. J. Gosselet (1832-1916). Notice nécrologique (*R.G.S.*, t. XXVII, 1916, pp. 389-391).

1917

158. Observation au sujet des minerais de fer oolithique [*C.R.S.S.G.F.*, 1917 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XVII), p. 135].
159. Sur l'épigénie du carbonate de chaux par l'oxyde de fer et la formation des oolithes ferrugineuses (Réponse à M. St. Meunier) (*C.R.S.S.G.F.*, 1917, pp. 142-143).
- 159^{bis}. Présentation d'échantillons de poudingue et de grès houillers, à galets ou à grains de charbon, recueillis dans le Westphalien inférieur des environs d'Ablaña (Asturies) (*C.R.S.S.G.F.*, 1917, p. 144).
160. Observation à propos de la limite inférieure de l'Oligocène (*C.R.S.S.G.F.*, 1917, p. 152).
161. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1916-1917 (Collège de France) (*A.C.F.*, 17^e année, p. 62).

1918

162. L'inventaire des minerais de fer armoricains (Travaux préparatoires du Congrès général du Génie civil) (brochure de 30 pp.).
163. Coup d'œil sur les minerais de fer de la presqu'île armoricaine (*B.S.F.M.*, t. XLI, pp. 134-176).
- 163^{bis}. La question du tétraphosphate de chaux au point de vue minéralogique (*C.R.A.A.*, t. IV).
- 163^{ter}. Considérations sur l'architecture du squelette des Invertébrés (*R.G.S.*, t. 29, 1918, pp. 454-456).
164. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1917-1918 (Collège de France) (*A.C.F.*, 18^e année, pp. 48-49).

1919

165. Observation sur les phosphates du Nord de l'Afrique [*C.R.S.S.G.F.*, 1919 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XIX), p. 96].
166. Le minerai de fer de Lorraine [*T.C.E.*, t. I, brochure de 37 pp., 1 carte (pl. III), pl. A].
167. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1918-1919 (Collège de France) (*A.C.F.*, 19^e année, p. 49).

1920

168. Les minerais de fer hettangiens de Bourgogne [*C.R.A.S.*, t. 170 (1920-I), pp. 1189-1191].
169. La sidérose des minerais de fer du bassin de Longwy-Briey (*C.R.A.S.*, t. 170, pp. 1456-1458).
170. Le quartz secondaire et le quartz rhomboédrique dans les minerais de fer du bassin de Longwy-Briey (*C.R.A.S.*, t. 170, pp. 1507-1509).
171. Pourquoi les minerais de Lorraine sont très phosphoreux [*C.R.A.S.*, t. 171 (1920-II), pp. 1219-1221].
172. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1919-1920 (Collège de France) (*A.C.F.*, 20^e année, pp. 69-70).

1921

173. Evolution minéralogique des minerais de fer oolithique de France, indépendante du facteur temps [*C.R.A.S.*, t. 172 (1921-I), pp. 119-121].
174. Notion d'un métamorphisme général sous-marin, déduite du remaniement des minerais de fer oolithique jurassiques, contemporain de leur dépôt (*C.R.A.S.*, t. 172, pp. 460-462).
175. Existence de nombreux spicules d'Alcyonaires dans les minerais de fer jurassiques de France (*C.R.A.S.*, t. 172, pp. 987-988).
176. Rôle pétrographique des Alcyonaires fossiles, déduit de l'analyse des minerais de fer jurassiques de France (*C.R.A.S.*, t. 172, pp. 1189-1191).
177. Les minerais de fer magnétique du bassin de Longwy-Briey (*C.R.A.S.*, t. 172, pp. 1513-1516).

178. Les minerais de fer de la presque île armoricaine (Conférence faite au district parisien de la Société de l'Industrie minière) [*R.I.M.*, 1931, comptes rendus des réunions, pp. 117-124 (nos 22 et 23)].
179. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1920-1921 (Collège de France) (*A.C.F.*, 21^e année, p. 61).

1922

180. Les minerais de fer oolithique de France. Fascicule II : Minerais de fer secondaires (*E.G.M.F.*, vol. de VIII+1051 pp., 35 pl.; mémoire résumé in *B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXIV, 1924, pp. 263-277).
181. Observations au sujet d'un mémoire de MM. P. LEMOINE et R. ABRARD, « Contribution à l'étude géologique du fond de la Manche » (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXII, pp. 9-10).
182. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1921-1922 (Collège de France) (*A.C.F.*, 22^e année, pp. 78-79).

1923

183. Minerai de fer magnétique de la couche grise de Hayange (Lorraine désannexée) [*Congrès scientifique international des Ingénieurs sortis de l'École de Liège. Section de Géologie (75^e anniversaire)*, pp. 61-69].
184. Le phénomène dit de l'impression dans les minerais de fer mésozoïques de France [*C.R.A.S.*, t. 176 (1923-I), pp. 1334-1336].
185. Rôle des Crinoïdes dans l'histoire des minerais de fer oolithique secondaires (*C.R.A.S.*, t. 176, pp. 1631-1633).
186. Observation au sujet d'une communication de M^{lle} PFENDER, « Sur l'existence de phtanites à Radiolaires dans les phyllades de la région toulonnaise » [*C.R.S.S.G.F.*, 1923 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXIII), p. 131].
187. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1922-1923 (Collège de France) (*A.C.F.*, 23^e année, pp. 71-72).

1924

188. Observations au sujet d'une note de M. L. JOLEAUD, « Les phosphates du Maroc » (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXIII, 1923, pp. 183-184).
189. Les grès feldspathiques de la chaîne hercynienne et les produits d'évaporation permo-triasiques [*C.R.A.S.*, t. 178 (1924-I), pp. 2103-2106].
190. Nouvelles données sur la glauconie, tirées de l'étude des formations crétacées traversées par le puits d'Harchies (Belgique) [*S.G.B.*, livre jubilaire (50^e anniversaire), pp. 65-82].
191. La question des jaspes à Radiolaires, au point de vue bathymétrique [*C.R.S.S.G.F.*, 1924 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXIV), pp. 11-12].
192. Etat actuel de la question des Cartes agronomiques en France (*Comité International de Pédologie, 5^e Commission: Cartographie des sols. Etat de l'étude et de la cartographie des sols dans divers pays de l'Europe*, pp. 85-92, Bucarest).

193. Les minerais de fer oolithique de France. Minerais de fer secondaires (Résumés du mémoire n° 180) (*C.R.S.S.G.F.*, 1924, pp. 89-91; *B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXIV, pp. 263-277).
194. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1923-1924 (Collège de France) (*A.C.F.*, 24^e année, pp. 52-53).

1925

195. L'âge relatif des phanites et dolomies du calcaire carbonifère du Nord de la France et de la Belgique [*C.R.A.S.*, t. 180 (1925-1), pp. 843-846].
196. L'âge relatif des silex et dolomies de la craie du bassin de Paris (*C.R.A.S.*, t. 180, pp. 1354-1356).
197. Origine sous-marine des silex en rognons et lits de la craie du bassin de Paris (*C.R.A.S.*, t. 180, pp. 1512-1515).
198. Existence de silex à Diatomées dans les caillasses du calcaire grossier des environs de Paris (*C.R.A.S.*, t. 180, pp. 1670-1672).
199. Existence de Diatomées dans les meulières des environs de Paris. Origine organique de la silice des meulières (*C.R.A.S.*, t. 180, pp. 1953-1955).
200. Origine éolienne de l'ergeron des environs de Paris [*C.R.C.G.I.*, XIII^e session, Bruxelles, 1922, comptes rendus (3^e fasc., 1926), pp. 1231-1234 (les tirés à part ont été distribués en 1925)].
201. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1924-1925 (Collège de France) (*A.C.F.*, 25^e année, pp. 91-92).

1926

202. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1925-1926 (Collège de France) (*A.C.F.*, 26^e année, pp. 35-36).

1927

203. Notice sur les travaux scientifiques de M. Lucien Cayeux (Supplément, 1914-1926) (petit in-4°, 28 pp., Imprimerie Protat Frères, Mâcon).
204. Formation des silex de la craie (Conférence) [*C.R.S.S.G.F.*, 1927 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXVII), pp. 210-213].
205. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1926-1927 (Collège de France) (*A.C.F.*, 27^e année, pp. 65-66).

1928

206. Observation au sujet d'une note de M. E. BRUET, « Sur les phosphates pulvérulents de la Tunisie centrale » [*C.R.S.S.G.F.*, 1928 (*B.S.G.F.*, 4^e série, t. XXVIII), p. 13].
207. Origine des sables des dunes sahariennes [*C.R.C.G.I.*, XIV^e session, Espagne, 1926, comptes rendus, pp. 783-788 (3^e fasc.)].

208. Existence de spongolithes d'eau douce dans le bassin houiller du Gard [*C.R.A.S.*, t. 187 (1928-II), pp. 1096-1098].
209. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1927-1928 (Collège de France) (*A.C.F.*, 28^e année, pp. 26-27).

1929

210. Les Calcsiphères typiques sont des Algues siphonnées [*C.R.A.S.*, t. 188 (1929-I), pp. 594-597].
211. Conditions de la mer silurienne à Graptolites en Normandie (*C.R.A.S.*, t. 188, pp. 1194-1198).
212. Les roches sédimentaires de France. Roches siliceuses (*M.E.C.G.F.*, vol. de VIII+774 pp., 30 pl.).
213. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1928-1929 (Collège de France) (*A.C.F.*, 29^e année, pp. 33-34).

1930

214. Existence de deux groupes d'Algues à structure conservée dans le « système schisto-calcaire » du Congo français [*C.R.A.S.*, t. 190 (1930-I), pp. 231-235].
215. Le Gothlandien du sondage de Danneville (Calvados) et son milieu générateur [Livre jubilaire publié à l'occasion du Centenaire de la Société géologique de France, pp. 197-212, pl. XXVII, XXVIII (t. I)].
216. Patine des silex de la craie [*B.S.F.M.*, t. LIII, Cinquantenaire de la Société française de Minéralogie (1878-1928), Livre jubilaire, pp. 60-72].
217. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1929-1930 (Collège de France) (*A.C.F.*, 30^e année, p. 52).

1931

218. Origine épigénique des dolomies jurassiques des Pyrénées [*C.R.A.S.*, t. 192 (1931-I), pp. 645-648].
219. La structure cone-in-cone en milieu schisteux (*C.R.A.S.*, t. 192, pp. 993-996).
220. Caractères pétrographiques des accidents magnésiens de la craie du bassin de Paris (*C.R.A.S.*, t. 192, pp. 1169-1172).
221. Généralités sur les minerais de fer de l'Ouest de la France (*Les mines de fer de l'Ouest de la France*, opuscule publié par la Chambre syndicale des Mines de fer de l'Ouest de la France, à l'occasion de l'Exposition Internationale de Liège, pp. 1-6).
222. Les minerais de fer de l'Ouest de la France. Constitution, mode de formation, origine du fer (Conférence faite à la section de Liège de l'Association des Ingénieurs sortis de l'École de Liège) (*R.U.M.*, 8^e série, t. V, 1^{er} semestre 1931, pp. 297-306).
223. Existence de restes organiques et notamment d'Algues siphonnées verticillées dans le système schisto-calcaire du Congo belge [*C.R.A.S.*, t. 193 (1931-II), pp. 11-14].

224. Origine secondaire de la structure radiée des oolithes marines anciennes (*C.R.A.S.*, t. 193, pp. 1368-1369).
225. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1930-1931 (Collège de France) (*A.C.F.*, 31^e année, pp. 62-63).

1932

226. Interprétation des gisements de craie magnésienne de Bimont (Oise) et d'Etretat (Seine-Inférieure) [*C.R.A.S.*, t. 194 (1932-I), pp. 217-221].
227. Observation sur la découverte récente d'Algues du groupe des *Sycidium* dans le système schisto-calcaire du Congo belge [*C.R.S.S.G.F. (B.S.G.F.)*, 5^e série, t. II), p. 32].
228. Les accidents magnésiens du bassin de Paris, envisagés dans leurs rapports avec les ruptures d'équilibre du fond des mers (*C.R.A.S.*, t. 194, pp. 504-507).
229. Observation au sujet d'une note de M. B. CHUBERT, « Découverte d'algues dévoniennes dans le Koundeloungou supérieur du Katanga » (*C.R.S.S.G.F.*, 1932, p. 62).
230. Interprétation des dépôts de phosphate de chaux dragués sur l'Agulhas-Bank, au Sud du cap de Bonne-Espérance (*C.R.A.S.*, t. 194, pp. 926-929).
231. Existence de nombreux grains de quartz, d'origine éolienne, dans l'Ordovicien des environs de Leningrad (*C.R.A.S.*, t. 194, pp. 1535-1537).
232. Manières d'être et diffusion de l'acide phosphorique dans les formations sédimentaires anciennes. Conséquences (*C.R.A.S.*, t. 194, pp. 1769-1773).
233. Remerciements au sujet de l'attribution du Prix Albert Gaudry [*C.R.S.S.G.F. (B.S.G.F.)*, 5^e série, t. II), pp. 151-153].
234. Les manières d'être de la glauconie en milieu calcaire [*C.R.A.S.*, t. 195 (1932-II), pp. 1050-1052].
235. Existence d'un phosphate à spicules de Calcisponges dans l'Ordovicien du Pays de Galles (*C.R.A.S.*, t. 195, pp. 1188-1190).
236. La pétrographie au Collège de France (Quatrième Centenaire du Collège de France, Livre jubilaire, pp. 125-130).
237. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1931-1932 (Collège de France) (*A.C.F.*, 32^e année, pp. 49-50).

1933

238. Le problème du phosphate de chaux (Discours présidentiel à l'Académie d'Agriculture de France, le 22 février 1933) (*C.R.A.A.*, t. XIX, pp. 240-253).
239. Constitution des phosphates dévoniens du Tennessee (États-Unis) [*C.R.A.S.*, t. 196 (1933-I), pp. 822-826].
240. Rôle des Trilobites dans la genèse des gisements de phosphate de chaux paléozoïques (*C.R.A.S.*, t. 196, pp. 1179-1182).

241. Hypothèse de l'origine végétale des phosphates de chaux paléozoïques (*C.R.A.S.*, t. 196, pp. 1564-1567).
242. Diagnostic différentiel des brèches sédimentaires et des brèches tectoniques (*C.R.A.S.*, t. 196, pp. 1844-1847).
243. Remaniement sous-marin des nodules phosphatés de l'Albien du bassin de Paris [*C.R.A.S.*, t. 197 (1933-II), pp. 1076-1078].
244. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1932-1933 (Collège de France) (*A.C.F.*, 33^e année, pp. 89-90).

1934

245. The Phosphatic Nodules of the Agulhas Bank (A Study of Submarine Geology) (*A.S.A.M.*, vol. XXXI, pp. 105-136, pl. XXXII-XXXV).
246. Les difficultés de la classification des sédiments calcaires anciens [*C.R.A.S.*, t. 198 (1934-I), pp. 2041-2044].
247. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1933-1934 (Collège de France) (*A.C.F.*, 34^e année, p. 50).

1935

248. La structure conglomérée en milieu lacustre dans la série sédimentaire ancienne de France [*C.R.A.S.*, t. 200 (1935-I), pp. 869-871].
249. Constitution des phosphates sénoniens de Syrie (*C.R.A.S.*, t. 200, pp. 1553-1555).
250. Constitution des phosphates sénoniens de Palestine et de Transjordanie (*C.R.A.S.*, t. 200, pp. 1893-1896).
251. Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées (calcaires et dolomies) (ouvrage publié sous les auspices et aux frais de la Fondation Singer-Polignac du Collège de France, in-4^o, iv+463 pp., 26 pl.).
252. Nouvelles données sur l'âge relatif des silex [*C.R.S.S.G.F.*, 1935 (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. V), pp. 173-175].
253. Constitution des phosphates sénoniens d'Égypte (*C.R.A.S.*, t. 200, pp. 2134-2137).
254. Les phosphates de chaux sédimentaires. Manières d'être et mode de formation, in « Les ressources minérales de la France d'outre-mer » [Publication du Bureau d'Études géologiques et minières coloniales, t. IV (*Le phosphate*), pp. 1-15].
255. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1934-1935 (Collège de France) (*A.C.F.*, 35^e année, pp. 80-81).

1936

256. Allocution présidentielle à la séance générale annuelle de la Société géologique de France [*C.R.S.S.G.F.*, 1936 (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. VI), pp. 173-179].
257. Structure réticulée de la silice, observée dans des phthanites précambriens et des phosphates « suessoniens » [*C.R.A.S.*, t. 203 (1936-II), pp. 6-8].

258. Les coprolithes des phosphates nord-africains (*C.R.A.S.*, t. 203, pp. 217-219).
259. Remarques au sujet de la note de MM. CONRAD KILIAN et THÉODORE MONOD, « De la découverte, dans le Sahara occidental, de microorganismes fossiles qui constitueraient un repère d'âge et de nature marine pour la série du Koundeloungou (Congo) » (*C.R.A.S.*, t. 203, p. 383).
260. Le microplankton des phosphates de la Tunisie et de l'Est algérien (*C.R.A.S.*, t. 203, pp. 477-480).
261. L'imprégnation hydrocarburée des phosphates nord-africains et son origine (*C.R.A.S.*, t. 203, pp. 639-642).
262. Existence de nombreuses Bactéries dans les phosphates sédimentaires de tout âge. Conséquences (*C.R.A.S.*, t. 203, pp. 1198-1200).
263. Phosphates sédimentaires et Bactéries (*C.R.S.S.G.F.*, 1936, p. 261).
264. Résumé du cours de géologie de l'année scolaire 1935-1936 (Collège de France) (*A.C.F.*, 36^e année, pp. 53-54).

1937

265. Signification des perturbations enregistrées par les phosphates du Hodna (Algérie) pendant et après leur dépôt [*C.R.A.S.*, t. 204 (1937-I), pp. 1093-1095].
266. Nouvelles données sur l'existence de Bactéries dans les roches sédimentaires anciennes (*C.R.A.S.*, t. 204, pp. 1517-1519).
267. Existence de Bactéries dans des roches sédimentaires anciennes, autres que les phosphates [*C.R.S.S.G.F.*, 1937 (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. VII), pp. 115-116].
268. Les anomalies de structure et de composition de phosphates albiens du bassin de Paris et les enseignements qui en découlent [*C.R.A.S.*, t. 205 (1937-II), pp. 1021-1023].

1938

269. Rôle des Foraminifères et du carbonate de chaux dans la fixation de certaines substances minérales [*C.R.A.S.*, t. 206 (1938-I), pp. 81-85].
270. Structure bréchoïde des craies phosphatées du Nord de la France et ses multiples origines (*C.R.A.S.*, t. 206, pp. 392-394).
271. Phosphates de Kourigha (Maroc) [*C.R.S.S.G.F.*, 1938 (*B.S.G.F.*, 5^e série, t. VIII), pp. 65-66].
272. Migration d'acide phosphorique, consécutive de la décalcification des craies phosphatées à *Belemnitella quadrata* du Nord de la France (*C.R.A.S.*, t. 206, pp. 1229-1231).
273. Existence d'un sable calcaire grossier à la base de la craie phosphatée sénonienne de la Picardie [*C.R.A.S.*, t. 207 (1938-II), pp. 200-201].
274. Le problème de l'ancien port de Tyr étudié à la lumière de la pétrographie (*C.R.A.S.*, t. 207, pp. 881-884).

1939

275. Dolomies et silex de la formation phosphatée suessonienne du Hodna (Constantine) [*C.R.A.S.*, t. 208 (1939-I), pp. 1541-1543].
276. Les « boulets calcaires » de la formation phosphatée du bassin de Gafsa (Tunisie) et les enseignements qui découlent de leur étude (*C.R.A.S.*, t. 208, pp. 1951-1953).
277. Rapports entre la constitution des phosphates en grains et la composition des dépôts stériles auxquels ils sont subordonnés [*C.R.A.S.*, t. 209 (1939-II), pp. 268-269].
278. Les phosphates de chaux sédimentaires de France (France métropolitaine et d'outre-Mer), t. I (*E.G.M.F.*, vol. de VI+349 pp., 15 pl.).

1940

279. Considérations sur la silice et les silex des phosphates à Diatomées de l'Afrique du Nord [*C.R.A.S.*, t. 211 (1940-II), pp. 169-172].
280. Enseignements tirés de la comparaison des concrétions phosphatées des mers actuelles et des nodules des formations sédimentaires anciennes (*C.R.A.S.*, t. 211, pp. 496-499).

1941

281. Diffusion de l'odontolite dans les phosphates suessonniens du Hodna (Département de Constantine) [*C.R.A.S.*, t. 212 (1941-I), pp. 413-414].
282. Rôle du carbonate de chaux et des phénomènes d'épigénie dans la genèse des minéraux non détritiques des roches sédimentaires (*C.R.A.S.*, t. 212, pp. 736-739).
283. Causes anciennes et causes actuelles en géologie (opuscule, 81 pp., Masson & Cie, éditeurs, Paris).
284. Les phosphates de chaux sédimentaires de France (France métropolitaine et d'outre-Mer). Tome II : Égypte, Tunisie, Algérie, pp. 351-659, pl. XVI-XXXIII (Secrétariat d'Etat à la Production industrielle, Bureau de Documentation minière, Paris, Imprimerie Nationale).
285. Les phosphates de chaux sédimentaires de France (France métropolitaine et d'outre-Mer). Tome III : Maroc et conclusions générales. (Cette troisième et dernière partie du mémoire sur les phosphates de chaux sédimentaires était presque achevée à la mort de Lucien Cayeux. Elle sera publiée ultérieurement.)
-