

INAUGURATION DE LA PLAQUE COMMÉMORATIVE

APPOSÉE SUR L'ÉCOLE OU ENSEIGNA

LUCIEN CAYEUX

à AVESNES - SUR - HELPE (Nord),

le dimanche 7 juillet 1946.

DISCOURS DE M. CHARLES JACOB,

Membre de l'Académie des sciences.

L'Académie des sciences s'associe de grand cœur à cette cérémonie, et, de sa part, il sera facile de souligner devant vous le noble exemple fourni par la carrière d'un confrère qui, parti de conditions très honorables, mais modestes, s'est élevé, par son inlassable labeur et son intelligence, jusqu'aux plus hauts sommets.

Né le 26 mars 1864, à Semousies, non loin d'ici sur la route de Maubeuge, Lucien Cayeux était bien de chez vous, appartenant à une famille enracinée dans l'Entre Sambre et Meuse.

Sans remonter à de plus lointaines archives, son père, Xavier, aîné de 10 enfants, soldat au Régiment des Guides sous le Second Empire, avait épousé, au retour du service, Sophie Thiroux de Se-

mousies, et tous deux, entourés de l'estime générale, exploitèrent la petite propriété qui subvint à leurs besoins. C'est ainsi, en pleine nature, au milieu de cultivateurs économes et travailleurs, que leur fils, Lucien, passa ses premières années. Il fréquenta l'école de son village, parcourant vos prés et vos bois, se familiarisant avec les plantes et collectionnant des insectes. Vif d'esprit, cependant déjà réfléchi et indépendant comme il le sera toute sa vie, il estima, à l'âge de douze ans, en savoir à peu près autant que son instituteur d'alors; si bien que, pendant les années suivantes, il n'hésitait pas, pour poursuivre son instruction, à faire pédestrement chaque jour les 7 kilomètres qui le séparaient d'Avesnes. Un peu plus tard, nous le trouvons — la plaque commémorative nous l'apprend — enseignant lui-même à cette école de la Rue des Prés, mais ce fut pour peu de temps.

La grande Université provinciale voisine, celle de Lille, était alors en plein essor. Parmi ses maîtres les plus éminents, elle comptait Jules Gosselet, le fondateur de l'école géologique du Nord, lui aussi bien de chez vous puisque d'une famille établie de longue date à Landrecies. Doublé déjà à l'époque du lillois Charles Barrois, son futur successeur et autre grand savant, Jules Gosselet était toujours en route par chemins et par vaux dans vos départements. Au cours de ses excursions, il remarqua le jeune Lucien Cayeux. En 1887, il le prit à ses côtés comme préparateur, mais ne le garda pas longtemps. En 1891, Marcel Bertrand, également une sommité du monde géologique, appela Cayeux avec les mêmes fonctions à l'École Nationale supérieure des Mines.

A Paris, votre compatriote, docteur ès sciences en 1897, est nommé, en 1901, professeur de géologie appliquée à l'agriculture à l'Institut National Agronomique. Puis, à titre tout à fait exceptionnel et bien que n'appartenant ni au Corps des Mines, ni à celui des Ponts et Chaussées, il succéda à Marcel Bertrand, d'abord comme suppléant en 1904, puis comme titulaire en 1907. En 1912 enfin, après la mort d'Auguste Michel-Lévy, il parvint à l'une de nos importantes

chaires scientifiques de recherche, celle de géologie du Collège de France.

Mieux que l'énumération fatalement un peu sèche de ces étapes, peut-on en quelques mots, vous donner une idée des magnifiques travaux qui les ont justifiées.

Le départ en est également près d'ici. Vous savez que vous vous trouvez vers la pointe occidentale du massif ancien de l'Ardenne, et que cette Ardenne est enveloppée du vaste manteau de craie constituant en particulier le principal du sous-sol du Cambrésis, de l'Artois et de la Picardie. Or, c'est à l'étude de la craie que Lucien Cayeux se consacra tout d'abord. Il l'a scrutée au microscope jusque dans ses plus infimes détails: constituants minéraux ou d'origine organique, variations de composition, conditions initiales de formation, évolutions ultérieures... rien ne lui a échappé.

Mais ce n'était là qu'une première incursion dans le domaine immense des strates déposées à toutes les époques géologiques, la plupart du temps sous l'eau, principalement dans les eaux marines. Leur gamme si variée a passé presque toute entière sous l'œil averti de ce micrographe incomparable, considéré aujourd'hui à bon droit comme l'un des fondateurs de la science des roches, de la pétrographie comme l'on dit, au moins de celle des roches sédimentaires. Ces roches sédimentaires, il y aurait lieu d'en citer le plus grand nombre: roches siliceuses, roches carbonatées, en insistant peut-être davantage sur d'autres qui sont d'un grand intérêt économique. Toutes nous ont valu de sa part d'importants mémoires, richement illustrés et devenus classiques.

Retenons les phosphates, non seulement ceux exploités au XIX^{me} siècle dans vos parages et résultat de l'altération, puis du lessivage naturel de la craie, mais aussi les belles couches sédimentaires constituant l'une des richesses de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc. Retenons encore les minerais de fer sédimentaires, d'âge bien divers: ceux du Jurassique de Lorraine, une des fortunes de la France, ceux primaires du Massif armoricain intéressants également

pour notre industrie et jusqu'aux minerais, plus anciens encore, du Lac Supérieur en Amérique du Nord.

Ces études entrecoupées de nombreux voyages, peuvent vous expliquer pourquoi, parmi les savants qui étudient l'écorce terrestre, il s'était acquis une notoriété largement étendue à l'étranger.

Chez nous, élu Membre de l'Institut dans la section de Minéralogie de l'Académie des Sciences, le 23 janvier 1928, il était également Membre titulaire de l'Académie d'Agriculture depuis 1917. Et cela nous conduit à vous parler en terminant d'un autre genre d'activité, qui, du reste, ne fut peut-être pas étranger à sa fin.

Il était rural dans l'âme. Chaque année, ayant conservé sa mère jusqu'en 1914, il revenait, avec Madame Lucien Cayeux, passer toutes ses vacances à Semousies. Hélas, durant l'occupation de 1914-18, la vieille maison du père Thiroux fut saccagée et pillée. C'est alors qu'attiré souvent dans l'Ouest de la France par ses travaux et sur l'insistance d'un ami, il s'organisa un domaine propre à Mauves-sur-Loire. Il s'y fixa à sa retraite en 1937. Néanmoins on le voyait encore parfois à Paris, et il nous souvient de l'avoir interrogé sur l'emploi de ses journées dans la Loire-Inférieure. Le matin, levé de bonne heure et chaussé de gros sabots, il circulait au grand air, taillant à l'occasion lui-même ses arbres fruitiers et ses vignes productrices d'un vin local, d'un « muscadet », dont il était fier. L'après-midi, penché sur son microscope, il revenait à ses chères roches sédimentaires. Mais, dans cette existence de sage, resté à l'écart et poursuivant en silence sa méditation et ses recherches, intervinrent les incidences de la guerre récente. Sans qu'il y fut pour rien, on le désigna comme maire de son importante commune, proche de Nantes d'où refluait de nombreux réfugiés. Il se dévoua sans trêve à cette tâche. Mais c'était sans doute beaucoup exiger de son attachement à une cause publique. Bien que resté très droit, très allant, élégant, toujours souriant et enthousiaste lorsqu'il parlait de science, subitement, dans l'après-midi du 1^{er} Novembre 1944, alors que l'ennemi

occupait encore la côte atlantique voisine, il s'affaissa. Un maître, un ami pour beaucoup d'entre nous, venait de « s'endormir du sommeil de la terre ».

Ainsi se terminait la vie d'un grand savant, dont il est heureux que, dans cette cité toute proche de son village natal, le souvenir soit respectueusement conservé, aussi bien que dans les sphères scientifiques compétentes du monde entier.

NOTICE
SUR L'OEUVRE SCIENTIFIQUE
DE
LUCIEN CAYEUX

(1864 - 1944)

PAR

M. LÉON BERTRAND (1)

Membre de l'Académie des sciences.

Les grands traits de la vie et de la carrière de Lucien Cayeux, né le 26 Mars 1864 à Semousies, dans le département du Nord, Membre de la Section de Minéralogie de l'Académie des sciences depuis le 23 janvier 1928 et décédé le 1^{er} Novembre 1944 en sa résidence de retraite à Mauves-sur-Loire, près de Nantes, ont été déjà retracés dans une publication de l'Institut, par M. Charles Jacob, en un discours prononcé le 7 juillet 1946, à l'inauguration d'une plaque

(1) Surpris par la maladie, M. Léon Bertrand est mort avant d'avoir pu terminer cette notice. Celle-ci était cependant presque entièrement rédigée. L'Académie a estimé devoir la publier telle que son auteur l'a laissée, sans y rien changer ni ajouter.

commémorative apposée sur l'école où Cayeux avait enseigné au début de sa carrière, à Avesnes-sur-Helpe (Nord). Aussi puis-je me borner ici à résumer l'œuvre scientifique considérable de mon prédécesseur et ancien collègue, qui s'est échelonnée sur plus d'un demi-siècle.

Cette œuvre, traduite par de nombreuses publications, parmi lesquelles plusieurs volumineux ouvrages sont accompagnés de nombreuses planches et figures dans le texte, a été consacrée, en majeure partie, à établir un corps de doctrine en un domaine de la science géologique qui, malgré quelques précurseurs (dont A. Delesse, membre de notre Section de Minéralogie de 1879 à 1881), avait été généralement très délaissé, avant Cayeux, par les géologues et même les pétrographes. Il s'agissait de la composition précise et des conditions de formation des *roches sédimentaires*, qui constituent cependant une part très importante des matériaux de la zone externe de l'écorce terrestre en un très grand nombre de régions de celle-ci. Pourtant avait déjà commencé, auparavant à briller d'un vif éclat en France l'étude de la composition et des conditions de genèse des *roches éruptives*, fondée sur l'examen des minéraux constitutifs de ces roches au microscope polarisant par les méthodes de détermination mises en honneur et précisées par Ferdinand Fouqué et Auguste Michel-Lévy dans leur magistral ouvrage *La Minéralogie micrographique*, suivi par le classique traité *Les Minéraux des Roches*, d'Auguste Michel-Lévy et de son élève Alfred Lacroix, à son tour devenu le maître français de la Pétrographie.

Lucien Cayeux, dans son étude parallèle des roches sédimentaires, a naturellement suivi la trace de ces maîtres, qui ont été ceux de sa génération et de la mienne, et utilisé leurs méthodes pour la détermination des minéraux de ces roches, soit que ceux-ci y proviennent *directement* de la destruction d'anciennes roches éruptives, soit qu'ils résultent de *néo-formations* et traduisant, par leur cristallisation, une évolution des anciens sédiments pour devenir des roches sédimentaires; ces minéraux, de l'une ou l'autre origine, constituent

une part, généralement prépondérante, des éléments des roches sédimentaires; Cayeux établit une documentation très complète pour la reconnaissance microscopique des restes de nombreux organismes, tant calcaires que siliceux, souvent présents dans les roches sédimentaires et même parfois assez abondants pour avoir eu un rôle capital dans la constitution des anciens sédiments dont elles sont dérivées. D'autre part, Lucien Cayeux a, très utilement, rassemblé et mis au point les diverses méthodes d'analyse, chimique, microchimique et chromatique, utilisables dans l'étude des roches sédimentaires et dont l'exposé constitue, pour une part égale à celle consacrée au diagnostic des éléments figurés (minéraux et restes d'organismes), la première partie d'une *Introduction à l'étude pétrographique des roches sédimentaires*, véritable manuel de technique, quoiqu'il s'agisse d'un volume grand in-4° de VIII + 524 pages, avec 80 figures dans le texte, accompagné d'un atlas de LVI planches. Il a d'ailleurs été publié, en 1916, dans la même série des *Mémoires pour servir à l'explication de la Carte géologique détaillée de la France* que la *Minéralogie micrographique* de Fouqué et Michel-Lévy, dont elle constitue le pendant pour les roches sédimentaires.

En dehors des très importants ouvrages analytiques et descriptifs consacrés aux diverses catégories de ces dernières, qui seront sommairement résumés plus loin, d'autres études géologiques de Lucien Cayeux, qui ont été orientées en des domaines géologiques différents du précédent, ainsi qu'il sera indiqué dans les pages suivantes, témoignent de l'éclectisme avec lequel, à l'occasion, il sut dominer avec un plein succès certaines questions parmi les plus délicates de la Géologie. Néanmoins, son nom restera surtout attaché à la description minutieuse et à la recherche des conditions génétiques des roches sédimentaires. Malheureusement cette précieuse œuvre de documentation, essentiellement descriptive et analytique, est restée inachevée au cours d'un dernier volume, pour les phosphates de chaux du Maroc.

Toutefois, alors que l'âge ne paraissait avoir aucune prise sur la

robuste santé de Cayeux, lorsque, de temps à autre, il faisait de courtes apparitions à Paris, depuis qu'à la suite de sa retraite universitaire il s'était fixé à Mauves-sur-Loire, où les délicates fonctions de maire sous l'occupation allemande, auxquelles l'avait appelé la confiance de ses concitoyens, étaient venues en dernier lieu absorber son activité, comme par une prescience de sa fin prématurée, sa dernière publication, datant de 1941, simple plaquette de 80 pages à peine, constituait véritablement la *conclusion géologique* de ses longues études pétrographiques sur les roches sédimentaires. Sous le titre: *Causes anciennes et causes actuelles en Géologie*, cette brochure pleine de vues originales renferme la quintessence de l'œuvre si considérable qu'il avait développée en de volumineux ouvrages de grand format et accompagnée de nombreuses planches documentaires. Il léguait à ses successeurs le produit de ses mûres réflexions sur la question qui avait absorbé la majeure partie de son activité, comme pour servir de base à de futures discussions que certainement il eût souhaitées, pour le progrès de cette branche de la Science géologique, à laquelle ses innombrables observations au microscope ont apporté une assise solide et à laquelle sa mémoire restera attachée comme celle de l'un de ses meilleurs ouvriers.

ÉTUDES SUR LES ROCHES SÉDIMENTAIRES.

Lucien Cayeux, d'abord Préparateur, en 1887, à la Faculté des Sciences de Lille, puis à Paris depuis 1891, aux Écoles nationales des Mines et des Ponts et Chaussées avait déjà publié une soixantaine de Notes préliminaires, en grande majorité relatives à la région du Nord de la France, lorsqu'il soutint, en 1897, devant la Faculté des Sciences de Lille, où avaient eu lieu ses débuts dans la recherche scientifique, une importante Thèse de Doctorat, imprimée dans les Mémoires de la Société géologique du Nord (1) et intitulée *Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires (I. Étude de quelques dépôts siliceux secondaires et tertiaires du Bassin de Paris et*

(1) T. IV, 2, in-4°, 580 p. et 10 planches.

de la Belgique; II. Craie du Bassin de Paris). L'Académie des Sciences lui attribuait, en 1898, le *Prix Vaillant*, pour lequel le sujet proposé avait été le suivant, évidemment correspondant au contenu de ce Mémoire: « Étude microscopique des sédiments (particulièrement des roches secondaires et tertiaires), entreprise au double point de vue de la genèse des dépôts et des modifications qu'ils ont pu subir dans la suite des âges ».

Tout au long de ce mémoire fondamental se montrent déjà les idées directrices que nous retrouverons dominantes, tout en ayant progressivement évolué, dans tout le cours de cette partie la plus importante de l'œuvre de Cayeux; en ce qui concerne les roches étudiées dans sa Thèse, elles comprenaient, en premier lieu, diverses *roches siliceuses*, de types aberrants par rapport à la série classique qui correspond aux *sables quartzeux*, parfois très purs (tel le sable de Fontainebleau), puis aux *grès* résultant de l'agglomération d'un tel sable par un ciment, généralement siliceux, moins souvent calcaire ou même argileux, ou accidentellement formé par un dépôt effectué par une solution métallifère. Ces roches particulières provenant de dépôts secondaires et tertiaires du bassin de Paris et de Belgique, où elles ont reçu des noms divers correspondant à des aspects et des caractères assez variés, sont formées, pour une part qui peut être dominante, de restes d'*organismes siliceux fossiles*, associés en proportions variables à des *grains quartzeux détritiques*, donc provenant de la destruction de roches quartzifères antérieures, et aussi à un *ciment silico-argileux*, dans la formation duquel sont intervenues des réactions chimiques. Cayeux a esquissé à ce propos une classification des roches siliceuses (qu'il a précisée dans un mémoire ultérieur) comprenant 1° les *grès*, dont la silice est exclusivement ou en majeure partie détritique; 2° les *gaizes*, dont la silice est détritique, organique et chimique; 3° les *spongolithes* et les *tripolis*, où elle est presque exclusivement organique (spicules d'éponges dans le premier cas, diatomées dans le second); 4° les *cherts*, *silex* et *meulière*s, où elle est exclusivement ou en majeure partie chimique.

Nous ne pouvons que citer ici, parmi les nombreux exemples étudiés par Cayeux dans sa thèse: diverses variétés de *gaizes* jurassiques et crétacées du Bassin de Paris; les formations voisines du Crétacé de Belgique dénommées *meules*, *têtes de chats*, *rabots*, *smectiques*; les *tuffeaux* (se rapprochant plutôt de grès à ciment siliceux opalifère ou calcédonieux) de l'Eocène du Nord de la France et de la Belgique. D'autre part, ces roches contiennent souvent de la *glauconie*, (silicate hydraté très complexe de FeO , Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , Na_2O , etc.) dont la genèse était considérée comme liée à la présence des organismes présents dans la roche, soit résultant d'une substitution à la silice ou même au calcaire de leurs squelettes, soit développée à la place même de la matière organique disparue. Mais Lucien Cayeux a reconnu qu'en dehors de la glauconie résultant de l'intervention des organismes, d'autres formes de glauconie existant dans les roches qu'il a étudiées apparaissent nettement indépendantes de cette intervention, laquelle paraît cependant la condition la plus fréquente de la production de glauconie pendant l'évolution des anciens sédiments.

La seconde partie du mémoire ayant servi de Thèse à L. Cayeux était une étude approfondie de la constitution de la *craie* dans les diverses régions du Bassin de Paris, en ce qui concerne ses *minéraux*, les restes d'*organismes* et la constitution d'un *ciment* formé de carbonate de chaux pulvérulent. Pour lui, ce dernier provient de la destruction des organismes de la craie, par des voies pouvant être différentes, et non d'une précipitation chimique contemporaine de la sédimentation, contrairement à une opinion courante (laquelle semble, toutefois, en partie soutenable). Cayeux a d'ailleurs admis que cette formation du ciment a pu se continuer après l'émersion de la craie et même souvent se continuer de nos jours, sous l'influence des eaux météoriques qui apportent du calcaire pris à la surface ou qui travaillent à la destruction des éléments organiques de la craie. La transformation de la boue crayeuse initiale et la production, à ses dépens, d'un calcaire pouvant devenir cristallin embrasseraient toute la période de temps comprise entre son dépôt et l'époque actuelle.

Lucien Cayeux traçait, ainsi qu'il suit, le tableau des *métamorphoses de la craie dans le temps*:

Aux yeux de la plupart des géologues, la craie est un dépôt aussi peu différent que possible de la boue dont elle procède. Pour eux, la genèse de rognons de silex aux dépens des dépouilles d'organismes siliceux disséminés dans le sédiment est la principale, sinon l'unique métamorphose. La vérité est que le limon crayeux primitif n'est passé à l'état de craie qu'après avoir subi de profondes modifications au triple point de vue minéral, organique et chimique.

1° Celles du domaine minéral ne sont pas les moins curieuses. Le Crétacé de Touraine fournit plusieurs exemples de genèse de quartz secondaire sur une grande échelle. La craie proprement dite contient également un peu de quartz formé *in situ*. La grande diffusion de l'orthose néogène, la présence de la leverriérite dans l'Yonne comptent parmi les particularités les plus intéressantes de la craie. On peut encore mentionner la production de la *glauconie* et du *phosphate de chaux*, le développement accidentel de *silice globulaire* et enfin la formation des *silex*. Je puis inscrire ici la *dolomie*, dont l'étude sera faite ultérieurement. L'introduction dans le ciment d'innombrables particules de carbonate de chaux complète l'ensemble des métamorphoses subies par la craie au seul point de vue minéral.

2° Dans le domaine organique, tout changement ne peut être qu'une destruction partielle ou complète de formes préexistantes. La plupart des *Spongiaires* siliceux ont abandonné leur silice pour former les *silex* ou silicifier des coquilles calcaires et sont aujourd'hui glauconieux, calcifiés et exceptionnellement transformés en phosphate de chaux, pyrite ou limonite. Sauf de très rares exceptions, les *Radiolaires* et *Diatomées* ont disparu, un grand nombre de *Foraminifères* sont détruits, beaucoup d'autres organismes ont subi un commencement de dissolution.

3° Les modifications d'ordres chimiques sont en partie la conséquence du déplacement de la silice des organismes siliceux. La genèse de la texture noduleuse de la craie et de la structure pseudo-oolithique du Crétacé de Touraine complètent ce tableau.

Tous les changements qui ont affecté la craie se résument par la production de substances minérales nouvelles et la destruction de formes organiques. Le terme ultime auquel aboutissent invariablement la majeure partie des sédiments calcaires organogènes, après de longues et nombreuses transformations est un calcaire cristallin dans lequel toute trace organique est effacée. J'ai observé dans le Sud-Ouest du bassin parisien maints dépôts rapprochés de ce stade final. La craie proprement dite en comporte quelques-uns. Toutes les craies qui paraissent les moins modifiées portent déjà l'empreinte d'une métamorphose qui n'est jamais négligeable.

On peut dire d'une façon générale que « la craie » est loin d'avoir conservé sa composition initiale. Malgré son apparence de sédiment non modifié, elle a commencé son évolution vers un état indéfiniment stable, caractérisé par l'anéantissement total des dépouilles organiques et la transformation de tout le carbonate de chaux en calcite largement cristallisée.

En ce qui regarde les conditions du dépôt de la craie, une question importante était discutée à fond par L. Cayeux dans sa Thèse. Le fait que, parmi la riche faune de Foraminifères existant dans la craie, se rencontrent beaucoup de Globigérines avait fait admettre généralement que la craie correspondrait à la boue à Globigérines de la zone bathyale des Océans actuels, c'est-à-dire à un sédiment de grande profondeur. Mais les Globigérines, organismes de surface, se rencontrent aussi dans les dépôts d'autres zones bathymétriques et, en considérant de très près les genres d'organismes de la craie qui ont persisté jusqu'à nos jours, L. Cayeux a reconnu « qu'ils enseignent que les profondeurs auxquelles ils vivent aujourd'hui ne sont pas du tout celles qui correspondent aux aires de dépôt de la vase à Globigérines, mais aux zones de sédiments terrigènes. Les nombreux genres d'Invertébrés communs à la craie et au limon crayeux actuel condamnent d'une façon définitive les analogies reconnues entre les deux dépôts. » Cette conclusion est d'ailleurs en accord avec le fait stratigraphique que de petites rides contemporaines du dépôt ont été érodées et durcies, ce qui ne s'expliquerait pas si ce dépôt se faisait à grande profondeur.

*
* *

L'exposé, très sommaire, qui précède démontre que, dès 1897, L. Cayeux avait déjà, outre les descriptions pétrographiques détaillées et l'examen des conditions géologiques dans lesquelles se rencontrent et ont pris naissance les roches siliceuses assez spéciales qu'il a étudiées et aussi la craie, mis en évidence certaines questions d'un caractère plus général et interprétatif, soulevées au cours de son étude. Ces questions ont été ensuite précisées et développées par Cayeux au cours des volumineuses monographies des diverses catégories de roches sédimentaires qui jalonnent ses recherches et constituent un ensemble documentaire extrêmement précieux, essentiellement analytique et descriptif, au point de vue pétrographique. En même temps, cette documentation est très importante par les conceptions qu'on en peut tirer en ce qui concerne les conditions géologiques dans lesquelles se sont produits les sédiments qui ont donné naissance à ces roches sédimentaires, ainsi que leur évolution ultérieure dans le temps, au sujet de laquelle nous verrons que l'opinion de Cayeux s'est considérablement modifiée à dater d'une Note aux Comptes Rendus de notre Académie, (1). Il ne saurait être ici question de chercher à résumer le contenu de ces monographies (dont chacune a été précédée de nombreuses Notes préliminaires) et je dois me borner à en donner la liste par ordre chronologique avec de brefs commentaires.

*
* *

Structure et origine des grès du Tertiaire parisien (2).

Tous ces grès sont essentiellement formés de grains détritiques de quartz, avec d'autres minéraux d'importance négligeable; en fait

(1) Séance du 10 janvier 1921, t. 172, p. 179.

(2) *Étude des gîtes minéraux de la France*, in-4°, 160 pages, 23 figures et X planches, 1906.

d'organismes, il n'existe guère que de nombreux débris de coquilles de Mollusques dans certains gisements fossilifères et seulement quelques gros Foraminifères siliceux. Le ciment qui les réunit est généralement siliceux ou calcaréo-siliceux, plus rarement calcaire ou exceptionnellement dolomitique, ferrugineux, manganésifère ou cobaltifère. Mais la place occupée par lui est toujours faible et il est fréquent que les minéraux se touchent, d'autant que dans les grès siliceux le ciment a souvent cristallisé autour des grains sableux de quartz en les nourrissant, ce qui a donné des *quartzites*, si cette cristallisation secondaire a été complète, ou des *quartzites-grès* ou des *grès-quartzites* si elle est restée incomplète.

Pour L. Cayeux, « toutes les probabilités sont en faveur de la notion que les seuls sables transformés en grès étaient les sables calcaires » (ce qui est peut-être une notion trop absolue), le calcaire ayant été déplacé par la silice, laquelle ne proviendrait pas d'organismes, mais de silice minérale empruntée au sable par la circulation des eaux, qui « serait l'agent principal, peut-être unique, de la transformation des sables calcaires en grès et quartzites ».

*
* *

Les minerais de fer oolithiques de France.

I. *Minerais de fer primaires* (1);

II. *Minerais de fer secondaires* (2);

Le minerai de fer de Lorraine (3);

et nombreuses Notes s'échelonnant entre 1909 et 1923.

L'étude des minerais de fer sédimentaires oolithiques, développée dans les ouvrages ci-dessus, constitue l'une des parties les plus

(1) *Étude des gîtes minéraux de la France*, in-4°, 344 pages, 37 figures et XIX planches, 1909.

(2) *Id.*, 4051 p., 63 fig. et XXXV pl. 1922, Grand Prix des Sciences physiques, Académie des Sciences 1923.

(3) *Trav. Comités d'Études, Section géologique*, in-4°, 37 p., 2 pl., 1919.

importantes sinon la plus importante, de l'œuvre de L. Cayeux, lequel avait déjà, en 1897, présenté, en même temps que sa Thèse principale, une seconde Thèse, mais non imprimée, sur ce sujet.

I) Les *minerais primaires*, très répandus dans le Silurien et rares au Dévonien, comprennent: 1° des minerais oolithiques proprement dits, où des oolithes ferrugineuses existent dans un ciment d'importance variable, avec ou sans restes organiques; 2° des minerais qui ont été oolithiques à un moment donné, mais qui, par métamorphisme, ont cessé de l'être ou ne le sont plus qu'en partie; 3° des minerais ne renfermant, le plus souvent, que des débris organiques roulés. Les oolithes ferrugineuses, construites sur le type des oolithes calcaires, c'est-à-dire formées de couches concentriques emboîtées, ont d'ailleurs une composition minéralogique variable, étant formées soit par du carbonate de fer (sidérose), soit par un silicate de fer à l'état d'une chlorite (bavalite), soit par des oxydes de fer (hématite rouge en profondeur et brune en surface). Mais le plus souvent, leur composition est mixte, certaines oolithes contenant à la fois sidérose, chlorite et hématite.

L. Cayeux a même reconnu que certaines sont encore en partie calcaires, de même que certains débris d'organismes primitivement calcaires ont été partiellement ferruginisés, et il a admis que, suivant un processus habituel de modifications successives, ont d'abord pris naissance les oolithes en carbonate de fer, subissant une transformation, partielle ou totale, en oolithes chloriteuses, puis de celles-ci en oolithes d'hématite, lesquelles peuvent d'ailleurs toutefois provenir directement, parfois, de celles de sidérose. Lorsque le ciment était calcaire, il a pu subir la même évolution, ainsi que les organismes calcaires qu'il pouvait rarement contenir, et qui peuvent simuler les oolithes (Encrines, Bryozoaires, Algues calcaires). Aussi Cayeux admettait-il que la plus grande partie de nos minerais oolithiques primaires se sont déposés sous la forme de calcaires oolithiques.

D'autre part, tous ces minerais contiennent de la silice, rarement

à l'état de grains détritiques de quartz, le plus souvent combinée dans la bavalite (qui est un hydrosilicate de fer et d'alumine et qui, lorsqu'elle s'est transformée en hématite, laisse une trame de silice), ou bien encore résultant d'une silicification qui a développé beaucoup de quartz secondaire.

II) Les *minerais secondaires*, étudiés dans le second volume, s'échelonnent depuis l'Hettangien, par les importantes couches du Lias supérieur lorrain, et dans divers étages jurassiques, jusqu'au Crétacé inférieur. Ils se présentent, comme ceux du Primaire, sous les stades successifs: calcaire, puis carbonaté, ensuite chloriteux (qui peut aussi manquer) et enfin hématisé, et cela encore à la fois en oolithes ferrugineuses et remplaçant des organismes calcaires (principalement les articles de Crinoïdes), pouvant coexister avec les oolithes ou caractériser à eux seuls certains de ces minerais. Il est aussi de même pour le ciment d'abord calcaire, dont l'évolution est toutefois normalement en retard d'un degré sur l'état atteint par les oolithes ou les organismes.

Un peu antérieurement à l'apparition du second volume, les études de Cayeux sur les minerais de Lorraine l'avaient déjà conduit à abandonner sa conception primitive du rôle du facteur temps dans l'évolution minéralogique de ces minerais, en une communication à l'Académie des Sciences (1), à laquelle j'ai fait allusion plus haut et qui portait le titre significatif: *Évolution minéralogique des minerais de fer oolithique de France, indépendante du facteur temps*. Il est utile de reproduire les arguments de faits qui ont conduit Cayeux à ce changement radical d'opinion.

La succession ascendante des couches des minerais de Lorraine montre sept horizons distincts: les *couches verte, noire et brune*, constituant le faisceau inférieur; les *couches grise et jaune*, formant le faisceau moyen et la *couche rouge* représentant avec les *calcaires ferrugineux* le faisceau supérieur. Or il résulte de l'analyse d'un grand nombre d'échantillons empruntés aux différentes couches, que

(1) Séance du 10 janvier 1924.

le fer carbonaté et le fer silicaté (chlorite) réalisent, en moyenne, leur maximum de fréquence dans le faisceau inférieur et, par conséquent, le plus ancien; que ces deux composés ferrugineux se retrouvent encore dans le faisceau moyen, mais avec une moindre abondance, et qu'ils deviennent très rares et manquent presque toujours dans le faisceau supérieur, c'est-à-dire le plus récent. Par contre, le fer oxydé atteint son maximum de fréquence dans le faisceau supérieur, et, pour tout dire, c'est dans la grande généralité des cas le seul et unique composé ferrugineux représenté à cet étage.

Étant donné l'ordre d'enchaînement indiqué plus haut, il est de toute évidence que *plus les minerais de Lorraine sont anciens, moins leurs composés ferrugineux sont transformés*. J'insiste sur le point que ladite règle se dégage avec une extrême netteté de mes analyses micrographiques. En conséquence, tout se passe comme si le facteur temps était resté étranger aux métamorphoses des minerais lorrains, conclusion diamétralement opposée à celle qui nous paraissait devoir être l'expression de la vérité.

En sortant du domaine particulièrement visé ici, des faits du même ordre sollicitent en foule notre attention. On sait notamment que le fer carbonaté inclus en bancs et rognons dans le terrain houiller est resté carbonaté jusqu'à nos jours. Que si nous remontons plus loin dans le passé, les minerais oolithiques siluriens de la presqu'île armoricaine nous fournissent, en grand nombre, des exemples de sidérose et de bavalite non modifiées, en dépit de la haute antiquité des dépôts auxquels ces éléments sont incorporés.

En revanche, des minerais plus récents que ceux de Lorraine, tels les minerais oolithiques bajociens, calloviens et oxfordiens, sont presque tous hématisés, c'est-à-dire arrivés au terme ultime de leurs transformations.

Bref, la règle énoncée plus haut, à savoir que l'évolution minéralogique des minerais de fers lorrains est indépendante du facteur temps, est, croyons-nous, une loi générale pour les minerais de fer oolithique de France, et je ne suis pas éloigné de croire qu'elle l'est

pour tous les minerais de fer d'origine sédimentaire. Il va sans dire que les parties des gîtes situées au-dessus du niveau hydrostatique ne sont nullement en cause dans la présente étude.

D'autre part, au cours de cette étude des minerais de Lorraine se montrent des *arrêts de développement*, invariablement liés à des *remaniement*; il semble qu'après ceux-ci, si les éléments ferrugineux étaient replacés dans des conditions semblables à celles dans lesquelles ils avaient pris naissance, leur évolution restait interrompue, ce que Cayeux a considéré comme l'indice que *cette évolution était due à une action bactérienne, donc biochimique*. Notons que dans ses dernières publications, il a étendu cette interprétation à la genèse d'autres roches sédimentaires et peut-être à la genèse des roches non détritiques en général.

L'existence fréquente, dans certaines couches de ces minerais, de *fragments remaniés* a conduit Cayeux à des constatations très intéressantes: ces fragments sont invariablement empruntés aux couches mêmes où ils sont inclus et, d'autre part, un très grand nombre d'entre eux provenaient de la direction du large et non de celle du rivage du continent voisin, où il est naturel d'admettre que se fasse l'arrivée de sels de fer provenant de l'altération à la surface du continent des nombreux minéraux ferrifères des roches éruptives et métamorphiques (si l'on n'admet pas l'hypothèse d'un apport dans le bassin sédimentaire par des « failles nourricières », émise par certains auteurs). De la discussion des faits observés, Cayeux conclut que la sédimentation qui a engendré les minerais oolithiques, dont aucun équivalent actuel n'a été rencontré dans les explorations sous-marines, était « celle de bassins en voie d'élévation, profondément troublés par des ruptures d'équilibre et soumis à l'influence de courants jouant le rôle d'agents de transport et d'érosion sous-marine ».

D'autre part, il concluait, dans son volume, que l'évolution minéralogique des oolithes et du ciment a été un phénomène extrêmement rapide, marchant de pair avec la sédimentation. Lorsqu'une couche de minerais de fer oolithique avait cessé de se développer, son his-

toire était terminée, abstraction faite, bien entendu, des transformations qu'elle a pu subir plus tard, à la surface, sous l'influence des agents météoriques. Cette histoire qui se déroulait sous la mer, constituait un véritable métamorphisme sous-marin (1).

*
* *

Les roches sédimentaires de France: Roches siliceuses (2).

En ce nouvel ouvrage, complétant son étude des roches siliceuses organogènes du Nord et de la Belgique et celle des Grès du Tertiaire parisien, Cayeux a visé à écrire une « Histoire naturelle » des roches siliceuses, en s'efforçant, « après avoir noté leurs caractères actuels, de remonter à leur composition première, puis de les suivre dans leurs métamorphoses successives et, finalement, d'en fixer le milieu générateur », en débordant ainsi du domaine pétrographique sur celui de la Géologie.

C'est ainsi qu'il les divise maintenant, du point de vue génétique, en trois groupes, suivant que leur origine est essentiellement détritique, ou organique, ou chimique; le premier groupe constitue les grès, avec leurs diverses variétés, le second des dépôts à spicules d'Éponges, ceux à Radiolaires et ceux à Diatomées, et le troisième plutôt des accidents siliceux dans d'autres roches que des roches indépendantes. Ces derniers constituent principalement, en milieu calcaire, les silex et les meulière, rarement formés en milieu marneux (silex ménilite) ou aussi des concrétions dans des dépôts riches en spicules d'éponges (cherts), tous principalement formés de calcédonite ou d'o-

(1) Nous pouvons noter que l'Académie des sciences a attribué le Grand Prix des Sciences physique de 1923 au présent ouvrage, où était considéré comme inexistant le rôle fondamental du facteur temps dans l'évolution des anciens sédiments, qui avait été admis comme capital dans le mémoire auquel elle avait attribué le Prix Vaillant en 1898; faisant ainsi preuve de l'éclectisme qui devrait être toujours la règle à l'égard des modifications que peut imposer à un auteur la suite de ses recherches, dans ses opinions.

(2) *Étude des gîtes minéraux de la France*, in-4°, 874 p., 17 fig., XXX pl., 1929.

pale, plutôt que de quartz, qui est resté stable et inerte dans l'histoire des roches, tandis que la silice organique a joué un grand rôle dans les modifications de ces dernières.

D'autre part, en ce qui regarde *l'influence du facteur temps sur l'état définitif* atteint par l'évolution de ces anciens sédiments, à laquelle Cayeux avait attaché une grande importance lors de ses premières publications, son opinion s'est aussi notablement modifiée à la suite d'une comparaison de roches siliceuses d'âges géologiques *primaires, secondaires et tertiaires*, choisies de telle façon qu'elles soient réellement comparables au point de vue de leur genèse. Or, cette comparaison de leur état final n'a nullement mis en évidence une transformation de la silice qui paraisse être l'œuvre du temps: le quartz prend naissance d'emblée, sans qu'on puisse observer le plus petit indice de transformation d'opale en calcédonite et de calcédonite en quartz, tandis que le contraire pourrait être vrai si l'on sortait du domaine des dépôts analysés à dessein pour éliminer toute action métamorphique de nature à fausser la comparaison... Ces constatations ramenaient Cayeux à une conclusion qu'il avait déjà formulée pour d'autres dépôts et qu'il tendait à généraliser de plus en plus; *l'histoire des roches siliceuses ne met en évidence aucune transformation importante dans laquelle on puisse voir la somme de petites modifications s'ajoutant peu à peu avec le temps. Elles sont aujourd'hui, ces roches, ce qu'elles étaient dès le principe, à moins qu'une action métamorphique provoquée par des phénomènes orogéniques ou éruptifs, ne les aient affectées postérieurement à leur formation.*

Et Cayeux conclut ainsi: «Cet enseignement nous éloigne beaucoup de l'opinion généralement admise et que j'ai faite mienne pendant longtemps, sous réserve de la contrôler à un moment donné. Je crois être dans le vrai en affirmant aujourd'hui que les roches siliceuses, pas plus que les minerais de fer oolithique, ne portent jamais la trace d'une évolution minéralogique plus ou moins continue, à dater de leur formation. Tout au contraire, leur histoire se termine de bonne heure, et à moins de grandes perturbations qui les soumet-

tent à des influences exceptionnelles, elles sont vouées à une stabilité sans fin. Si j'osais traduire toute ma pensée, je dirais de ces roches qu'elles sont *mortes*».

Cette conclusion montre combien, sous l'empire de ses observations minutieuses et précises sur les roches sédimentaires, son opinion avait, en 1929, considérablement évolué depuis qu'en 1898 l'Académie des sciences lui avait décerné le Prix Vaillant.

*
* *

Les roches sédimentaires de France. Roches carbonatées (calcaires et dolomies) (1).

Ici devait se placer une analyse que l'auteur de cette notice, arrêté dans son travail par la maladie qui l'a emporté, n'a pas pu rédiger.

*
* *

Les phosphates de chaux sédimentaires de France (France métropolitaine et d'Outre-Mer) (2).

En cet important ouvrage, malheureusement resté incomplet, Cayeux a étudié la répartition, dans le temps et dans l'espace, des phosphates de chaux sédimentaires, et cela aussi bien sur notre sol métropolitain que celui de la France d'Outre-Mer et même qu'en d'autres régions, ainsi que va l'indiquer l'énumération sommaire des matières traitées dans les deux volumes qui sont parus.

1) En une première partie, sont envisagés les *phosphates paléozoïques*, qui se montrent en *nodules*, presque tous *carbons*, la teneur en

(1) Un vol. in-4°, 463 p., 9 fig. et XXVI pl., 1935, Masson et C^{ie}, édit. (Ouvrage publié aux frais de la Fondation Singer-Polignac.

(2) *Étude des gîtes minéraux de la France*, Tome I, 349, p., 24 fig., XV pl., 1939. Tome II, p. 351-659, fig. 25-61. pl. XVI-XXXVI, 1941.

carbone résultant d'une association au phosphate soit de matière carbonneuse, soit de matière bitumineuse, le phosphate provenant, comme on le sait, de l'apatite fréquente dans toutes les roches cristallines. Dans cette partie sont successivement envisagés les phosphates *cambriens* de Suède, ceux du *Silurien* de France, d'Angleterre, de Suède, d'Esthonie, de Russie, de Roumanie et du Tennessee; puis ceux du *Dévonien* de France, de l'Ardenne et du Tennessee; ensuite viennent les phosphates *carbonifères* des Pyrénées et de la Montagne-Noire, en France, et ceux de Pologne; la série se termine par les phosphates *perméens* des Montagnes-Rocheuses (Wyoming et Idaho). C'est d'ailleurs au Paléozoïque que se rencontre le maximum de développement des phosphates sédimentaires.

II) Une seconde série de gisements correspond aux *phosphates en nodules de l'époque secondaire*, comprenant: des nodules *jurassiques* de Russie; des nodules *infra-crétacés*, les uns dans l'*Aptien* du Bassin de Paris, les autres dans l'*Albien* du Bassin de Paris, du Bassin du Rhône, d'Angleterre, de Suisse (Interlaken), de Russie; et enfin des nodules *cénomaniens* dans le Bassin de Paris, en Russie et en Pologne.

III) Un troisième groupe comprend des *Phosphates en grains dans le Crétacé supérieur*: *Turonien* du Bassin de Paris et d'Angleterre; *Sénonien* du Bassin de Paris, de Belgique, d'Angleterre, de Russie, de Pologne, de Syrie, de Palestine, de Transjordanie.

IV) Un quatrième groupe, débutant avec le tome II (resté inachevé) comprend les *phosphates en grains crétacés et tertiaires de l'Afrique septentrionale* (malheureusement resté inachevé par la mort de Cayeux) dont une première partie est consacrée aux phosphates du *Sénonien d'Égypte*, se rencontrant dans le Bassin de la Mer Rouge, dans la vallée du Nil et dans le désert lybique et une seconde partie, beaucoup plus importante pour nous, devait comprendre les importants gisements situés géologiquement dans les couches terminales du *Crétacé et les premières du Tertiaire (Suessonien)* de la Tunisie, de l'Algérie et du Maroc. Malheureusement le tome II, après les gise-

ments de Tunisie et de l'extrême Est algérien, puis de la région de Sétif (département de Constantine) et de celle de Boghari (département d'Alger), se termine brusquement.

*
* *

Causes anciennes et causes actuelles en géologie (1).

Ainsi qu'il a été dit au début de cette Notice, l'opuscule dont il est ici question est un exposé synthétique des conclusions des recherches de Cayeux sur les roches sédimentaires, du point de vue de certaines particularités géologiques des conditions de la sédimentation qui leur a donné naissance.

En 1830, Ch. Lyell, en réaction contre l'ancienne théorie des *révolutions du globe*, mise en honneur par Cuvier, émettait l'opinion que « les anciens changements survenus à la surface de la terre sont dus à des causes analogues, quant à la nature et à l'intensité, à celles qui agissent de nos jours », au lieu de résulter de véritables cataclysmes. Depuis lors, cette notion, au sujet de laquelle Lyell avait eu déjà un précurseur, en 1825, dans notre ancien confrère Constant Prévost, est devenue pour les géologues un véritable axiome et la considération des *phénomènes actuels* le fondement de l'interprétation des faits géologiques anciens.

Toutefois, quoique admettant que l'efficacité de la théorie des *Causes actuelles* ne saurait être sujette à discussion, Cayeux a été amené à déduire des résultats de ses nombreuses observations, la conception que *bien des Causes anciennes n'ont pas leur équivalent parmi les Causes actuelles*. Dans les exemples qu'il en donne, une place prépondérante est occupée par les phosphates de chaux et les minerais de fer oolithique, deux groupes de dépôts n'existant pas dans la série sédimentaire actuelle (on ne connaît aucun dépôt de minerai oolithi-

(1) 80 p. in-8°, Masson et C^{ie}, 1941.

que et si des dragages sous-marins ont ramené des nodules de phosphate, leur étude a démontré qu'ils sont des *concrétions* de phosphate pouvant provenir d'une formation antérieure mais non le produit d'une véritable sédimentation phosphatée actuelle).

En ce qui regarde les phosphates, la *craie phosphatée* du bassin parisien, grise, grossière et essentiellement formée de petits grains de phosphate, qui est intercalée entre deux séries de craies blanches très fines et passe latéralement à une craie blanche semblable, *n'est pas un dépôt littoral*, comme on a pu le penser d'après l'existence d'un ravinement de la craie sous-jacente et d'un conglomérat de base formé d'éléments de ce substratum, mais *un dépôt détritique engendré en milieu pélagique, à distance du rivage en des points singuliers où existaient des conditions de faible profondeur se rapprochant de celles qui se rencontrent près d'un rivage*. Les phosphates nord-africains du Suessonien, de leur côté, se présentent en couches multiples, formées de grains grossiers pétris de Diatomées avec quelques Radiolaires, qui s'intercalent dans des dépôts calcaires à Globigérines, chacune reposant sur un substratum *raviné ou perforé* et contenant souvent, à sa base, des fragments remaniés de celui-ci. Elles correspondent donc à un *changement de régime du fond sous-marin*, ayant entraîné la formation de phosphate pétri d'organismes *siliceux* au milieu d'une sédimentation *calcaire*. Cayeux admet que ces « ruptures d'équilibre », susceptibles de multiples récurrences en un même point, ont été fréquentes dans les mers anciennes, à certaines époques, sans qu'on en trouve d'exemple dans les mers actuelles.

Nous avons vu précédemment, à propos des minerais de fer oolithique, que Cayeux attribue leur formation, sujette à de même récurrences, à une sédimentation en des régions dont le fond sous-marin était en voie d'élévation et soumis à des courants jouant le rôle d'agent de transport et d'érosion sous-marine, à distance des rivages. Mais leur histoire se complique des changements minéralogiques conduisant du calcaire à l'hématite, qui, suivant la conception

finale de Cayeux, ont constitué une évolution très rapide et s'étant déroulée sous la mer, ce dont les mers actuelles ne montrent aucun exemple dans les résultats des explorations sous-marines.

En sa dernière publication, Cayeux insiste beaucoup sur l'importance en Géologie des phénomènes de remaniements sous-marins, dont nous venons de voir des exemples, et qui sont la conséquence de l'instabilité du fond permettant l'élaboration, loin des côtes, de sédiments à faciès littoral ou sublittoral prêtant à confusion sur le terrain pour le géologue.

Cayeux distingue aussi divers autres exemples de faits n'ayant pas attiré l'attention des géologues et qui, selon lui, marquent d'anciennes ruptures d'équilibre de fonds marins: c'est le cas pour l'existence, dans les *minerais de fer oolithiques*, depuis l'Hettangien jusque dans le Barrémien, des matériaux remaniés toujours empruntés à la couche de minerai dont ils font partie intégrante, l'élévation du fond n'étant d'ailleurs pas telle que la remise en mouvement ait atteint le substratum.

En ce qui concerne le *milieu phosphaté*, des remaniements sont connus à la fois dans les phosphates en *grains* (cas analogue au précédent) et dans ceux en *nodules*, qui se rencontrent finalement dans une gangue qui n'est jamais la roche-mère des produits remaniés, dont le déplacement s'est fait en général vers le large. Des concrétions phosphatées ont été draguées sur le fond de mer actuelles, surtout dans les boues et sables verts; J. Murray et A.-F. Renard ayant constaté, pour ceux dragués par le Challenger, que les minéraux et organismes qu'ils renferment sont identiques à ceux des sédiments renfermant ces nodules, ils en ont conclu que ceux-ci sont des *concrétions engendrées in situ*. Mais la conclusion inverse s'impose pour les nodules de phosphate des *mers anciennes*, lesquels, à de rares exceptions près, ont été remaniés soit dans leur roche-mère, soit dans une roche différente; par exemple, dans les phosphates de Gafsa, les grains de phosphate *engendrés en milieu pélagique*, car ils sont pétris de carapaces de Diatomées très délicates et sans miné-

raux détritiques, ont été entraînés par des courants dans une sédimentation néritique, comportant de puissants amas d'huîtres et de volumineux galets. Jusqu'à plus ample informé, de telles conditions sont loin d'exister dans les mers actuelles.

Un cas très curieux d'évaporation en pleine mer a été rencontré dans le Gothlandien de Normandie, où un sondage à Danneville (Calvados) a rencontré un calcaire pétri de cristaux microscopiques de calcite ayant épigénisé d'anciens cristaux de gypse.

D'autre part, nous avons vu que Cayeux, après avoir admis une évolution prolongée dans le temps des anciens sédiments, est arrivé à la conception inverse, suivant laquelle s'est produite une consolidation sous-marine ayant marché presque de pair avec la sédimentation. C'est ainsi que Cayeux indique des exemples de formation de silex sur le fond de la mer, les uns dans une craie, où des tables de silex ont été bréchifiées *in situ*, et d'autres de phosphates tunisiens, accompagnés de dolomies avec galets de silex, tandis que de telles formations sont inconnues sur le fond de mers actuelles. Il en est de même pour la genèse de nodules calcaires, soit dans les minerais de fer de Lorraine, où ils ont été ferruginisés, soit dans les phosphates du Sud-Tunisien, en sorte que Cayeux conclut que, « jusqu'à plus ample informé, en l'absence de concentrations similaires au fond des Océans, un vaste chapitre de l'histoire des roches sédimentaires ne bénéficie d'aucune manière de la connaissance des phénomènes actuels. »

Un autre exemple de ruptures d'équilibre du fond sous-marin se produisant sans modification des rivages ni action de la terre ferme, mais par des mouvements propres et locaux du fond, est fourni par les horizons de craie noduleuse (ce terme n'indiquant qu'une simple apparence et non une véritable structure en nodules), intercalés au milieu de la craie blanche normale et susceptibles de se multiplier par dizaines et de dominer localement sur la craie blanche, dont ils ne diffèrent pas par la microstructure, ni pas sensiblement par l'apport d'éléments détritiques, mais simplement par des interruptions

momentanées de la sédimentation et l'intervention de courants ayant ou non raviné et érodé la surface de la vase crayeuse.

La craie montre, d'autre part, dans le bassin de Paris, deux époques de *craie magnésienne* résultant d'un processus de *dolomitisation*. Mais, tandis qu'un tel processus, connu dans les mers actuelles, s'y montre lié à l'activité corallienne, dans les cas en question il s'est produit une transformation d'une vase crayeuse sans aucune action corallienne, lors de ruptures d'équilibre du fond sous-marin.

En résumé, certaines causes ayant joué un rôle fondamental dans la production de divers sédiments anciens n'interviennent pas du tout, d'après Cayeux, dans l'élaboration des sédiments actuels, étant liées à des activités qui, pour lui, seraient au repos à l'époque actuelle.

Parmi ces « ruptures d'équilibre » du fond sous-marin, certaines — comme l'a montré l'étude des conditions stratigraphiques de la craie phosphatée du bassin parisien — ont pu être le résultat d'un *plissement* du fond, dont, parmi les plis, de très faible rayon, les plus accusés ont pu être isoclinaux, renversés et même couchés; à ces mouvements ont pu s'ajouter des phénomènes de transgression et de discordance. D'autre part, nous savons que le remaniement, contemporain de la sédimentation, du minerai de fer colithique implique une tendance à l'émersion du fond et, par suite, au ridement de celui-ci.

Dans un autre ordre d'idées, Cayeux envisage les *Synthèses minérales en milieu sous-marin*, c'est-à-dire les « néoformations » de minéraux se produisant dans les sédiments. Pour lui, actuellement, « tout se passe comme si les fonds recouverts par les vases à Globigérines, à Diatomées et à Radiolaires étaient impropres à la genèse de synthèses minérales ». Or, de nos jours, la *sédimentation phosphatée* est absolument inconnue, tandis qu'elle s'est développée à grande échelle aux diverses époques de formation des phosphates *en grains*, résultant d'une vaste activité chimique ou biochimique sous-marine, et que d'autre part, les gisements de cette sorte sont

de beaucoup les plus répandus dans d'anciennes vases à Foraminifères, à Diatomées et à Radiolaires. Ainsi, ces vases pélagiques, impropres au développement des phosphates dans la série sédimentaire actuelle, ont réalisé dans le passé les conditions les plus favorables à leur genèse. En fait, d'ailleurs, les milieux propices à la production en grand des phosphates dans la série sédimentaire, à des époques géologiques très différentes, étaient d'une diversité extrême, s'étendant de dépôts à caractères franchement détritiques jusqu'aux formations de haute mer les plus typiques.

De même, à maintes époques anciennes s'est produite une véritable *sédimentation ferrugineuse*, « dont il n'existe pas les plus petites traces dans les mers actuelles ».

« Qu'il soit possible, ou non, de démêler les raisons de cette différence profonde, peu importe, les faits n'en subsistent pas moins ».

En tout cas, la conclusion générale de l'opuscule final de Cayeux est que « l'époque actuelle est caractérisée par le repos de toute une « série d'activités qui ont joué un grand rôle dans la formation des sédiments, au cours des temps géologiques. Il en est ainsi parce qu'elle « est, par excellence, une période de grande stabilité du niveau de la « mer et des fonds sous-marins. En quoi, elle est une exception par « rapport à l'ensemble des périodes géologiques.

« Le régime des anciennes mers étudiées tire l'une de ses caractéristiques de la fréquence des perturbations que j'ai qualifiées de « ruptures d'équilibre. Cette notion de ruptures d'équilibre, synonyme « de troubles profonds dans les conditions de milieu et dans la sédimentation, revient à chaque instant — tel un leit motiv — dans le « développement de ces recherches. C'est qu'autour d'elle orbitent « toute une série de phénomènes, de nos jours inconnus, relevant de « ce que j'appellerai les *Causes anciennes*, par opposition aux *Causes* « *actuelles* de Ch. Lyell. Est-il besoin d'ajouter que ces ruptures « d'équilibre n'ont rien de l'ampleur et de la généralité des cataclysmes invoqués par Cuvier. Ce ne sont, ni plus, ni moins, que des

« perturbations régionales, sans nulle influence sur les domaines qui
« échappent à leur action directe.

« De pareils troubles déclanchent des activités nouvelles, *dynami-*
« *ques, organiques, chimiques et bio-chimiques*, génératrices de nou-
« veaux dépôts. Sous leur influence, le fond des anciennes mers
« constitue un vaste laboratoire d'où sortent des produits variés, que
« pendant longtemps on s'est plu à attribuer, soit à l'action prolongée
« d'agents météoriques, soit à l'intervention mystérieuse de sources
« agissant sur le fond de la mer, ou au cours d'une période conti-
« nentale. Nul doute aujourd'hui que le milieu sous-marin joue un
« rôle capital dans les transformations subies par ses sédiments
« après leur dépôts...

« Du faisceau de données mises en valeur dans les pages précé-
« dentes et des enseignements qui en découlent se dégage, en toute
« clarté, une idée directrice, appelée, croyons-nous, à prendre une
« importance croissante avec les progrès de nos connaissances :

« *Il est nécessaire de réserver une place à des Causes anciennes, à*
« *côté des Causes actuelles, dans l'étude des formations sédimentaires de*
« *l'écorce terrestre, si l'on veut faire appel à toutes les lumières sus-*
« *ceptibles de nous en donner l'intelligence* ».

*

* *

Mais n'est-il pas permis, au lieu d'admettre que l'époque actuelle est « une exception par rapport à l'ensemble des périodes géologiques », de faire remarquer que les sondages sous-marins fournissent seulement des indications sur ce qui a lieu à un moment donné et en des points isolés de la surface du fond sous-marin; tandis que les études géologiques des couches qui se sont superposées en un ancien fond émergé — surtout si elles contiennent des matières exploitées telles que les phosphates et les minerais de fer — permettent d'analyser à loisir la composition, la succession, les relations mutuelles et la continuité de ces couches sur une certaine étendue. Il est facilement concevable, dans ces conditions, que la documenta-

tion sur la sédimentation *actuelle*, bien moins complète à certains égards que celle que fournit l'étude géologique des sédiments anciens et cela aussi entachée d'hypothèses que soit celle-ci, ne puisse éclairer toute la genèse des roches sédimentaires, sans que pour cela, les « Causes anciennes » soient au repos à l'époque *actuelle*.
