

136 00 56 34 Z

M 3477

GEORGES MILLOT

ANCIEN ÉLÈVE DE L'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE
AGRÉGÉ DE L'UNIVERSITÉ - DOCTEUR ES-SCIENCES
CHEF DE TRAVAUX A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE NANCY

Service Commun de la Documentation

INPL

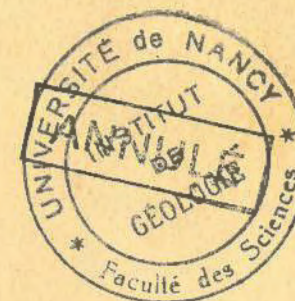
Nancy-Brabois

RELATIONS ENTRE LA CONSTITUTION

ET LA GENÈSE DES

ROCHES SÉDIMENTAIRES ARGILEUSES

Service Commun de la Documentation
INPL
Nancy-Brabois



EXTRAIT DE :

"GÉOLOGIE APPLIQUÉE
ET PROSPECTION MINIÈRE"

1949 - TOME II - N° 2-3-4

94, Avenue de Strasbourg, NANCY

TABLE DES MATIÈRES

	Page
AVANT-PROPOS	11
INTRODUCTION	17

PREMIÈRE PARTIE

DÉFINITIONS ET MÉTHODES

CHAPITRE PREMIER. — DÉFINITIONS	21
I Milieu de Genèse et Conditions de Sédimentation ..	23
II Les Minéraux argileux	38
III Les Roches argileuses	48
IV Historique des recherches sur la constitution et la genèse des roches argileuses sédimentaires	52
CHAPITRE SECOND. — MÉTHODES D'ETUDE DES ROCHES ARGILEUSES	59
CHAPITRE TROISIÈME. — MÉTHODE D'ETUDE DE LA PHASE ARGILEUSE	79
I Extraction de la phase argileuse	79
II Dispersion mécanique et ultrasonique	83
III Utilisation des Rayons X	92
IV Utilisation de l'analyse thermique différentielle ...	108
V Utilisation de l'analyse chimique et calcul des for- mules des minéraux	116
VI Méthodes diverses	123

DEUXIÈME PARTIE

LES FAITS

CHAPITRE QUATRIÈME. — ETUDE SYSTEMATIQUE DES ROCHES D'ORIGINE MARINE	126
N° 1 Darnieulles (Vosges) Muschelkalk	129
N° 2 Héming (Moselle) Muschelkalk	131
N° 3 Gironcourt (Vosges) Rhétien	133
N° 3 bis Crévic (M.-et-M.) Rhétien	135
N° 4 et 5 Xeulley (M.-et-M.) Sinémurien	137
N° 6 Gérardcourt (M.-et-M.) Sinémurien	140
N° 7 Nancy (M.-et-M.) Charmouthien	142
N° 8 et 9 Jeandelaincourt (M.-et-M.) Charmouthien ..	145

N° 10 Schiste carton de Nancy (M.-et-M. Toarcien	148
N° 11 Ludres (M.-et-M.) Toarcien	151
N° 12 et 13 Champigneulle (M.-et-M.) Toarcien	153
N° 14 Liffol-le-Grand (Vosges) Callovien	156
N° 15 La Seigne (Doubs) Oxfordien	158
N° 16 et 17 Ecroutes (M.-et-M.) Oxfordien	160
N° 18 Poissons (Haute-Marne) Kimméridgien	163
N° 19 Louvemont (Haute-Marne) Aptien	165
N° 20 Moeslains (Haute-Marne) Albien inférieur	167
N° 21 Moeslains (Haute-Marne) Albien supérieur	170
N° 22 Senonches (E.-et-L.) Turonien	172

CHAPITRE CINQUIÈME. — ETUDE SYSTEMATIQUE DE ROCHES D'ORIGINE LAGUNAIRE

N° 23 et 24 Pexonne (M.-et-M.) Muschelkalk	175
N° 25 et 26 Deyvillers (Vosges) Muschelkalk	181
N° 27 et 28 Housseras (Vosges) Muschelkalk	184
N° 29 Rambervillers (Vosges) Muschelkalk	187
N° 30 Damelevières (M.-et-M.) Muschelkalk supérieur Lettenkohle	189
N° 31 Bainville-aux-Miroirs (M.-et-M.) Keuper	192
N° 32 Rosières-aux-Salines (M.-et-M.) Keuper	194
N° 33 et 34 Domjulien (Vosges) Keuper	196
N° 35 Djebel Ghassoul (Maroc) Jurassique	199
N° 36, 36 bis, 36 ter Mormoiron (Vaucluse) Ludien . .	201
N° 37 Cormeilles-en-Parisis (S.-et-O.) Ludien	205
N° 38 Cormeilles-en-Parisis (S.-et-O.) Sannoisien . . .	207
N° 39 Pechelbronn (Bas-Rhin) Sannoisien	209
N° 40 Mulhouse (Haut-Rhin) Sannoisien	212
N° 41 Ensisheim (Haut-Rhin) Sannoisien	213
N° 42 Fresnes (S.-et-O.) Sannoisien	216
N° 43 Salinelles (Gard) Stampien	218
N° 44 Chott ech Chergui (Algérie) Actuel	221

CHAPITRE SIXIÈME. — ETUDE SYSTEMATIQUE DE ROCHES D'ORIGINE LACUSTRE

N° 45 et 46 Baudour (Hainaut-Belgique) Wealdien . .	225
N° 47 Soumancourt (Haute-Marne) Barrémien	229
N° 48 et 49 Pays de Bray-Wealdien	232
N° 50 et 51 Douzillac (Dordogne) et Montguyon (Cha- rente-Maritime) Sidérolitique	234
N° 52 et 53 Bassin de Provins (Seine-et-Marne) Spar- nacien	237
N° 54 Westerwald (Allemagne) Chattien-Aquitanién . .	239
N° 56 Herbéville (S.-et-O.) Lutétien	240

N° 57 Cormeilles-en-Parisis (S.-et-O.) Sannoisien . . .	242
N° 58 et 59 Gergovie (Puy-de-Dôme) Stampien	244
N° 60 Donnery (Loiret) Aquitanién	246
N° 61 Gergovie (Puy-de-Dôme) Burdigalien	249

TROISIÈME PARTIE

INTERPRETATIONS

CHAPITRE SEPTIÈME. — LOIS STATISTIQUES	251
I Variations de la nature des minéraux argileux ex- traits des Roches sédimentaires	252
II Variations de la composition chimique de la Phase argileuse	258
III Variations du pH actuel des Roches sédimentaires argileuses	264
CHAPITRE HUITIÈME. — ESSAI SUR LA GENESE DES MINÉRAUX ARGILEUX DANS LA SEDIMENTATION . .	271
I Les roches argileuses sont-elles des dépôts détri- tiques fins ?	271
II Le pH est-il responsable des variations de la phase argileuse dans les milieux de sédimentation ? . . .	277
III Revue de quelques travaux sur l'influence du milieu sur la genèse des minéraux argileux	279
IV Essai sur la genèse des minéraux argileux dans les roches sédimentaires	287
V Application de l'essai proposé aux Roches argileuses étudiées	292
CHAPITRE NEUVIÈME. — CONSEQUENCES GEOCHI- MIQUES	305
I Remarques sur la composition chimique des Roches argileuses et leur sort dans le métamorphisme . .	306
II L'altération des Roches feldspathiques	312
III Le cycle des substances silico-alumineuses	318
CONCLUSIONS GENERALES	329
BIBLIOGRAPHIE	339

AVANT - PROPOS

C'est d'une manière fortuite que je me suis orienté vers des Recherches sur la Genèse des Roches sédimentaires. Au cours de mes études à Paris je n'avais cherché qu'à étendre la culture superficielle qu'on recherche autour de sa vingtième année. A ce sujet je rends hommage à la mémoire de M. BRUHAT, Directeur de l'Ecole Normale Supérieure, mort pour la France en déportation d'une manière cruelle. Cet esprit si large exigeait de ses élèves un apprentissage aussi varié que possible et de la part de ses « naturalistes » en particulier une certaine formation physico-chimique. Je n'ai compris que plus tard à quel point il est précieux de n'être pas spécialisé trop tôt. A la sortie de la Faculté et ayant commencé l'apprentissage du travail géologique sur le terrain, il était à peu près convenu que j'aborderais des recherches sur le Prérif. M. TERMIER, alors chef du service géologique du Maroc, m'en permettait l'accès. La libération de l'Afrique du Nord me ferma ce champ d'action, ce qui fut un petit inconvénient à côté de l'immense espoir qu'elle souleva dans le pays. Après avoir un instant formé le projet de reprendre l'étude du métamorphisme nord-pyrénéen, l'interdiction de circuler dans ces régions m'empêcha d'y songer plus longtemps.

Il fut alors décidé que j'étudierais les roches sédimentaires et leur Genèse, en prenant, comme terrain d'étude, la Lorraine, qui devait normalement rester le plus longtemps accessible pour un universitaire de Nancy. Ayant commencé par les Roches les moins connues, les Roches argileuses, le sujet de mon travail se limita très vite à cette seule catégorie de Roches et c'est le produit de 7 ans de recherches et de réflexions que je livre aujourd'hui dans ce mémoire. Ce travail, mené avec des tâches familiales et professionnelles passionnantes mais préoccupantes, en une période difficile et avec une santé fragile au début, n'aurait pas été possible sans l'aide morale et matérielle de mes maîtres, de mes aînés et de mes amis.

Ma reconnaissance va d'abord à M. Louis BARRABÉ, professeur à la Sorbonne et Directeur du Laboratoire de Géologie de l'Ecole Normale Supérieure. J'ai trouvé, en 1938, à l'Ecole Normale, un laboratoire moderne et bien équipé, la conversation de mes anciens, une bibliothèque silencieuse et bien garnie, mais surtout la direction libérale, patiente, mais infiniment profonde de mon premier maître. C'est sous la conduite de M. BARRABÉ que j'ai fait con-

naissance avec l'enseignement supérieur et que j'ai fourni mes premiers efforts dans le vaste domaine de la science. La jeunesse a parfois le tort de s'attribuer le résultat de ces efforts, mais bien vite elle sait rendre hommage à ceux qui les ont suscités et je suis heureux de le faire publiquement ici. De plus M. BARRABÉ m'a guidé dans mes premières recherches sur le terrain et m'a donc initié à l'esprit et aux joies de la recherche scientifique. Sans cesse depuis 12 ans il a été pour moi un « parrain » attentif et sa culture considérable m'a guidé dans l'apprentissage d'un métier dont il est le meilleur témoin.

De la rue d'Ulm chaque jour je gagnais la Sorbonne, et plus tard, le laboratoire de Géologie appliquée de la rue St-Jacques. Là j'assistais, étonné, à l'enseignement des savants qui y professaient alors : MM. JACOB, MICHEL LÉVY, PIVETEAU et E. ROCH d'une part, et MM. LANQUINE, BARRABÉ et CUVILLIER de l'autre. Mon étonnement venait de leur science profonde, mais aussi de l'immensité des problèmes non résolus, dont ils soulevaient les inconnues. La contradiction entre tant de savoir et tant de mystère m'initiait à l'esprit scientifique tandis que le contact avec de semblables maîtres contribuait à mon dressage initial. J'étais à l'âge attentif où chaque mot prononcé par un Professeur d'Université, surtout lorsque cette parole est personnelle, est enregistré, mûri et réfléchi par l'étudiant qui cherche sa voie. Sentant aujourd'hui cette lourde responsabilité peser sur moi, je suis reconnaissant à mes maîtres parisiens d'avoir été tels que chaque parole qu'ils m'ont adressée a été un encouragement, une éducation ou un bienfait. Mon meilleur merci sera de chercher à leur ressembler.

Je dois une reconnaissance particulière à M. Charles JACOB, membre de l'Institut, car, en plus de son enseignement et de ses conseils, il fut attentif à mon sort en plusieurs circonstances. Directeur du Centre National de la Recherche scientifique, il a aidé un jeune assistant provincial que les conséquences de la guerre mettaient en danger; il lui a permis par cette aide de guérir et d'éviter la misère pour ses enfants. Une attention aussi discrète et aussi efficace me permet de lui redire mon attachement filial.

C'est à la Sorbonne qu'au cours de la guerre, j'ai rencontré M. Pierre PRUVOST, doyen de la Faculté des Sciences de Lille dont il était chassé. Je ne veux pas ici témoigner indiscretement de la bonté de ce savant qui ne compte que des amis. Mais je peux dire qu'il est un sentiment qui restera éternellement un levier incomparable dans l'éducation : il s'agit de la Confiance. Quand un jeune homme, ne sachant rien, cherche à la fois la connaissance et l'orientation de sa vie et qu'il bénéficie brusquement de la confiance totale et affectueuse d'un Aîné, arrivé au sommet de la

culture et de l'autorité, il lui prend une énergie invincible pour mériter semblable attention et tâcher d'imiter, dans le service quotidien, un exemple aussi généreux, ouvert, et dévoué à la cause commune.

C'est au cours de mes dernières semaines de séjour à l'Ecole Normale que je rencontrai M. Marcel ROUBAULT, directeur alors de l'Institut de Géologie appliquée de Nancy, devenu depuis Ecole Nationale d'Ingénieurs. Je songeais à cette époque à devenir géologue dans les territoires d'Outre-mer. M. ROUBAULT, lui, cherchait un assistant, et M. BARRABÉ lui avait donné mon nom comme celui d'un candidat possible. Je vis un jour arriver dans mon laboratoire, un homme vif, jeune, à la voix rapide et forte et j'assistais, muet à un spectacle extraordinaire : on me déplaça des documents et des cartes où s'illustrait le rôle du Géologue moderne dans l'Economie; on me décrivit le métier d'ingénieur géologue dans les territoires d'outre mer; on me montra les plans d'un laboratoire moderne de traitement mécanique des minerais. En m'invitant à venir concourir à la formation des géologues techniciens français on me montrait les plans d'un réaménagement du vieil Institut de Géologie, bien plus on me montrait la place de mon futur laboratoire. On partit en me laissant surpris et tenté. Je demandais à réfléchir mais que pouvais-je réfléchir ? Un jeune homme ne peut résister à semblable langage. Trois mois plus tard je prenais le train pour Nancy rejoindre M. ROUBAULT : je ne l'ai plus quitté depuis; les installations prévues sont faites, un bâtiment nouveau qui doublera la capacité de l'Ecole se termine.

Je dois à ce « Directeur » le spectacle et l'apprentissage de l'action, de l'optimisme et de l'autorité. Je lui dois les preuves d'affection les plus touchantes et les plus efficaces dans les grandes épreuves qui m'ont visité depuis 7 ans. Je lui dois une direction ferme au service honnête et exigeant de la « Chose publique ». Je lui dois d'être son second dans une belle entreprise, où une équipe unie en toutes circonstances, travaille dans la joie, à une œuvre commune.

C'est dans une pareille atmosphère active et vivante et avec les moyens que l'Ecole de Géologie de Nancy fournit à ses chercheurs, que j'ai réalisé le travail que je présente ici, et il est inconcevable que cette formation et cette atmosphère ne l'aient pas marqué. Je dois encore à M. ROUBAULT une direction aussi ferme sur le plan scientifique que dans l'action quotidienne. Absolument non conformiste et peu craintif des hypothèses hardies, M. ROUBAULT exige le travail bien fait et minutieux ainsi que les observations

rigoureuses. C'est à lui que je dois l'esprit et le plan de mon travail. Les faits doivent être exposés pour eux-mêmes et ce n'est qu'ensuite que des interprétations plus ou moins solides doivent être livrées à la critique et au temps. Pour le capital global que je dois à un chef et à un maître qui veut bien parfois me traiter en ami, je présente ici publiquement l'expression de mes remerciements et de mon affection.

Les spécialistes français qu'intéressent les Argiles ont été pour moi des aînés obligeants dont les conseils m'étaient indispensables pour mener mon effort.

Le premier, M. ORCEL, professeur au Muséum d'Histoire naturelle, qui vient chaque année enseigner à Nancy, s'est intéressé à mes projets et les a encouragés. Sa compréhension affectueuse et attentive était bien précieuse à un provincial et sa qualité de précurseur dans l'étude des minéraux phylliteux en fit pour moi un conseiller encourageant. Bien plus, il a bien voulu mettre les grandes ressources de son laboratoire à mon service.

Au début d'un travail qui demande des techniques un peu spéciales, j'ai trouvé chez M. A. RIVIERE un aîné averti. J'ai pu faire dans son laboratoire un apprentissage d'un mois des techniques d'attaque et de dispersion des Roches qui sont à la base de toute détermination pétrographique. Je le remercie d'avoir bien voulu me faciliter le départ.

J'ai eu la chance d'être reçu ensuite par M. J. DE LAPPARENT. Etant sans doute le dernier de ses élèves, je dois à sa mémoire de dire que ce fut dans mes recherches sur les Argiles, le Maître auquel je dois le plus. Sa culture extraordinaire, sa minutie très grande dans le travail et la perspicacité si audacieuse de ses interprétations étaient un ravissement pour l'esprit. Du jour où il m'accorda quelques longues après-midi et où je devins un familier de ses écrits et de son mode de pensée, toute une partie du mystère des « Pierres », comme il l'aurait dit, s'éclaira pour moi, avec de nouvelles directions de recherche.

M. A. LANQUINE, Professeur à la Sorbonne, m'a reçu avec son affabilité si courtoise. Il a bien voulu me permettre certains essais sur sa collection de terres réfractaires afin que je puisse compléter une série de données numériques. Je remercie vivement ce pionnier de la Géologie des roches argileuses.

Enfin parmi les spécialistes qui furent pour moi des guides, je fais ici la place la plus récente mais non la moins reconnaissante à M^{lle} CAILLÈRE et à M. HÉNIN. Non seulement ils m'ont aidé de leurs techniques mais ils m'ont conseillé et ont discuté avec moi maintes parties de ce travail, malgré leurs multiples tâches. Bénéfi-

cier de leur autorité mondiale pour la vérification de mes essais est un privilège auquel j'ai été fort sensible.

Nombreux sont les savants qui m'ont prêté le secours de leurs techniques, de leurs appareils ou de leurs spécialités. Je remercie en particulier : M. le docteur Marcel VERAÏN, qui m'a donné une hospitalité charmante dans son laboratoire et m'a permis le maniement de son appareil à ultrasons; MM. WYART et OLMER, qui ont fait les premiers spectres de Rayons X; M. MICHAUD, dont l'appui fut déterminant dans la confection de ces diagrammes et qui m'a manifesté l'amitié la plus complète et la confiance la plus grande; M. PATUREAU, qui m'a fait profiter de son habileté dans l'analyse chimique des silicates grâce au laboratoire d'analyse du CNRS; M. CUVILLIER, qui m'a assuré une bonne détermination des microfossiles; M^{lle} MATHIEU-SICAUD, qui a réalisé une magnifique photographie au microscope électronique et qui a bien voulu la voir publier ici; enfin M. MAC EWAN d'Harpender, qui a examiné mes déterminations radiographiques.

Je remercie également tous les Géologues ou Minéralogistes qui m'ont envoyé des échantillons, soit pour les étudier, soit pour servir de référence. Parmi eux je pense spécialement à M. A. LANQUINE et à sa belle collection de terres réfractaires; à M. J. DE LAPPARENT et à ses minéraux types; à MM. BOURCART et LUCAS, de Paris, M. MARLIÈRE, de Belgique, M. NAGELSCHMIDT, d'Angleterre; MM. BRADLEY et ROSS, des U.S.A., M. PRAX, de Paris, MM. ROQUES et MICHEL, de Clermont-Ferrand, MM. MARCAIS et MORIN, du Maroc, M. BENEITO, d'Algérie, MM. MAUBEUGE, LECOMTE, de SAINT-OURS, et FROISSART, de Nancy. Enfin je ne peux séparer de cet hommage celui que je dois à tous les amis qui ont travaillé avec moi pendant des années. Ils m'ont aidé de leurs conversations, de leurs critiques, de leurs travaux, ou encore de leur constante attention à préserver pour moi les heures précieuses de la recherche. Je pense en particulier à M. NOISETTE, compagnon de recherches, et à M. BOLFA, correcteur compétent et ami toujours secourable dans l'ordre de la minéralogie, à MM. WEPPE, LAPADU-HARGUES et SADRAN, contradicteurs aimables, et d'une manière générale à tous ceux avec lesquels j'ai travaillé dans l'amitié et la confiance depuis sept ans sous le toit de l'Ecole Nationale de Géologie appliquée et de Prospection minière. Plusieurs d'entre ces personnes ont bien voulu relire et corriger le manuscrit ainsi que M. URION, doyen de la Faculté des Sciences de Nancy, et M. MATHIEU, maître de conférences à la Faculté des Sciences de Nancy, avant que M. ROUBAULT, au cours de plusieurs lectures successives, m'aide à lui donner son allure définitive.

Je remercie M. le Directeur du CNRS qui par ses allocations a permis l'équipement de mon laboratoire et la confection des ana-

lyses chimiques. Sont associés à cet hommage MM. les Membres de la Commission de Géologie et de Minéralogie du CNRS, dont l'attention m'a été favorable.

Dans l'ordre de la réalisation du mémoire M. WEPPE m'a aidé dans la composition, la Maison MEMIN pour le tirage des Planches. M. DIDRY, maître imprimeur, avec ses collaborateurs de l'Imprimerie du Centre, en a assuré une présentation claire et économique.

L'Association des Ingénieurs Géologues de l'Université de Nancy m'a donné l'hospitalité dans la Revue « Géologie appliquée et Prospection minière ». C'est pour moi une nouvelle obligation pour servir sans compter les membres de cette corporation dont beaucoup, d'élèves sont devenus mes amis.

INTRODUCTION

Les savants et les techniciens qui s'intéressent aux argiles sont très nombreux : minéralogistes, géologues, pédologues, métallogénistes, chimistes, céramistes, métallurgistes, foreurs, pétroliers, hydrologues, etc... Cette énumération ne peut être complète en raison du grand nombre des applications modernes des argiles dans l'industrie. De plus, dans chacune de ces spécialités, le nombre des chercheurs est grand. Parmi ceux-ci, les géologues ont de tous temps étudié les niveaux argileux, soit dans un but purement stratigraphique, paléogéographique ou structural, soit dans le but d'aider les utilisateurs à en exploiter les gîtes.

Depuis l'origine de la géologie les niveaux argileux ont été situés, nommés, décrits, datés et classés. De plus, les géologues cherchèrent à reconstituer le milieu de genèse des niveaux de toute sorte qu'ils étudiaient. Même en admettant une difficulté supplémentaire pour certains niveaux argileux, ils surent le plus souvent qualifier par leur faciès les affleurements des Roches argileuses. Pour ce faire, les géologues utilisèrent les multiples méthodes qui leur sont familières : étude de l'étendue du gîte, de ses passages latéraux, de sa stratification, de ses roches encaissantes; observations des concrétions et de tous les accidents pétrographiques visibles dans les roches; enfin, étude fondamentale des animaux et végétaux fossiles. C'est ainsi que presque toujours un niveau argileux, comme tout autre niveau sédimentaire, a été qualifié génétiquement. On a reconstitué l'allure du milieu où il a pris naissance : mer, lagune, lac, moraine, terrasse fluviale, dépôt éolien, etc...

Il a été possible d'approcher ce qu'on appelle d'une manière générale le milieu de genèse. Parfois même, on a pu préciser les conditions dans lesquelles les sédiments sont nés dans ce milieu de genèse, c'est-à-dire les conditions de sédimentation.

Plus délicate pour le géologue fut l'étude de la constitution pétrographique des roches argileuses sédimentaires découvertes dans de tels niveaux. Sans le secours de techniques toutes modernes, la qualification certaine d'un matériau pulvérulent restait aléatoire. La chimie, même par une analyse rationnelle, ne permettait pas de pénétrer sûrement la nature des mélanges tandis que le pouvoir séparateur du microscope était le plus souvent, trop faible pour déterminer des éléments minéralogiques, si fins, qu'on les disait

souvent amorphes. Cependant, et surtout depuis 1935, l'entrée en jeu des techniques nouvelles de la minéralogie permit au géologue de faire l'inventaire des minéraux contenus dans les argiles et il est aujourd'hui possible de parvenir à des déterminations satisfaisantes.

Il reste au géologue un dernier effort à faire pour tirer d'une catégorie de roches tout l'enseignement qu'elle peut donner. Menant de front l'inventaire des constituants et la reconstitution des conditions de leur genèse, il peut se faire que des coïncidences se révèlent. Il peut arriver que toutes les roches nées dans des conditions semblables aient quelque constituant commun. Réciproquement, il peut arriver que les roches ayant des constituants communs soient nées dans des conditions similaires. Ici commence ce qu'on appelle la pétrographie causale. Cette pétrographie causale nécessite à la fois la pétrographie analytique descriptive et les études des gisements sur les terrains. Par le rapprochement des données de ces deux démarches préliminaires, elle met en relief la causalité ou déterminisme des associations ou paragénèses minérales. La science contemporaine nous montre une floraison de semblables efforts dans l'étude de tous les matériaux de l'écorce terrestre, qu'il s'agisse de roches éruptives, volcaniques, métamorphiques, sédimentaires ou des constituants des gîtes minéraux. Cet effort appliqué à l'interprétation causale de la nature des roches argileuses a déjà été abordé. Le résumé de nos connaissances progressives sera fait au chapitre historique, mais de nombreux travaux seront encore nécessaires avant que la pétrographie causale des roches argileuses sédimentaires soit bâtie. Il est vrai qu'il n'y a guère que 15 ans que les techniques minéralogiques modernes sont à la disposition des pétrographes pour permettre la détermination des minéraux argileux dans les roches. Il est vrai aussi, que les méthodes ne sont pas encore toutes mises au point et chaque mois, de nouveaux critères ou de nouveaux modes de détermination s'ajoutent à ceux qu'on admettait ou les modifient. Dans ces conditions il est naturel qu'une comparaison systématique des roches argileuses entre elles *en fonction de leurs conditions de sédimentation* n'ait pas encore eu le temps d'être très avancée. A défaut d'un inventaire bien élargi, des coups de sonde ont été donnés. La perspicacité des savants raisonnant sur des documents isolés, peu nombreux et dispersés dans la bibliographie, a déjà proposé quelques idées générales valables. Cependant les hypothèses d'une portée un peu générale proposées par les quelques savants qui, *d'un point de vue géologique*, se sont posé le problème de la genèse des roches argileuses, apparaissent souvent à la fois partielles et partiellement contradictoires entre elles. Ceci est naturel mais montre à l'évidence que cet effort n'est pas terminé.

Au cours du présent travail, j'ai tenté d'apporter ma part à l'étude de la constitution des roches sédimentaires argileuses *en fonction de leur genèse*. Amené à cette étude par l'analyse de sédiments lorrains, il est probable que mon point de vue se montrera lui aussi particulier et partiel. D'autre part, une telle entreprise nécessite le maniement de techniques appartenant aux disciplines assez variées que sont la Géologie, la Minéralogie, et même la Physique et la Chimie. Incapable de les dominer toutes, on se sent vite arrêté quand on recherche la causalité profonde de la genèse d'un type de roche plutôt que d'un autre dans un milieu plutôt que dans un autre.

Néanmoins, pour approcher les vrais problèmes, l'analyse devait être tentée puisque rien ne peut être démontré sans elle. Le but que je me suis fixé a donc été le suivant :

1° Prélever des échantillons de roches dans un certain nombre de niveaux sédimentaires argileux dont les conditions de sédimentation soient définies par toutes les données de la géologie classique, en particulier par l'étude de leur faciès et de la paléogéographie de l'époque de leur dépôt.

2° Faire une étude analytique aussi serrée que possible de ces échantillons en utilisant les méthodes d'étude mises au point à l'heure actuelle et en portant la part principale de l'effort sur la fraction vraiment argileuse de ces roches.

3° Comparer les résultats entre eux en fonction de ce qui est connu sur les conditions de genèse des roches. Rechercher les coïncidences. Vérifier jusqu'à quel point des minéraux ou groupes de minéraux argileux caractérisent différents milieux de sédimentation et avec quelle précision.

4° Amorcer si possible une explication causale de ces éventuelles coïncidences entre une constitution donnée et un milieu donné avec l'aide des résultats des disciplines voisines et des hypothèses géochimiques aujourd'hui recevables.

C'est ce travail que nous exposons ici en trois parties.

I. — Définition et méthodes utilisées.

II. — Les faits.

III. — Lois statistiques et interprétations.

PREMIÈRE PARTIE

DÉFINITIONS ET MÉTHODES

CHAPITRE PREMIER

DÉFINITIONS

Introduction

Les Argiles, Ambiguïté de cette locution

Le mot « argile » appartient au langage courant et désigne en français une sorte de terre fine qui fait pâte avec l'eau et que l'on peut utiliser comme terre à modeler. Ce mot commun est passé dans le langage scientifique. Jusqu'au début de ce siècle, de nombreux produits naturels qu'on pouvait désigner par le mot « argile » ont été pris pour des *espèces minérales*. Cependant que les mélanges étaient connus et méritaient par exemple la dénomination d'*argile impure*. C'est ainsi que LACROIX (197) étudie sur la fin du siècle dernier les *Argiles pures*, par opposition aux argiles sédimentaires qui sont de véritables roches et où toutes sortes de minéraux peuvent être mêlés. Argiles pures et Argiles impures ont en fait à cette époque une limite assez floue, qui dépendait du degré de pénétration des méthodes utilisées. En fait le nombre des *argiles dites pures* a diminué sans cesse, car les méthodes d'analyse allant en se perfectionnant la plupart apparurent comme des mélanges. Et le mot mélange désigne non seulement un mélange d'« argile pure » avec du sable, des carbonates ou de l'oxyde de fer mais un mélange de plusieurs « argiles pures » entre elles.

Un exemple d'une telle sorte de mélange peut être pris dans le kaolin qui passe pour une argile pure. Mais un grand nombre de

kaolins naturels sont mêlés de quartz. On précise les choses en distinguant la « roche Kaolin » du « minéral Kaolinite » et l'on s'aperçut ensuite que le minéral kaolinite se trouve dans bien d'autres roches que le kaolin.

Il y a donc un vocabulaire à préciser pour se faire comprendre et les conventions proposées par P. URBAIN (374) sont les meilleures. Les argiles pures sont appelées « Minéraux caractéristiques des roches argileuses » ou plus brièvement « Minéraux argileux ». La minéralogie en fait l'inventaire et un petit nombre de noms d'espèces minérales est aujourd'hui reçu. Ce ne fut pas toujours le cas; d'innombrables mélanges furent pris pour des espèces minérales aux temps où seule l'analyse chimique pouvait être utilisée, mais nous savons que les minéraux argileux ne comportent guère aujourd'hui que 5 grands groupes et une quinzaine d'espèces. Par ailleurs, les argiles impures doivent s'appeler aujourd'hui « roches argileuses ». Ce sont des mélanges d'un ou plusieurs minéraux argileux avec les minéraux les plus divers au premier rang desquels se trouvent le quartz, la calcite et les sels de fer.

Parmi les roches argileuses il y a diverses catégories. Les unes sont des formations résiduelles ou d'altération comme les argiles de décalcification et les kaolins. D'autres sont proprement sédimentaires c'est-à-dire qu'elles se sont sédimentées dans l'eau et c'est à ces dernières que ce travail est consacré.

En résumé, le mot argile désigne :

1° des espèces minérales qui sont rares. Appelées autrefois « argiles pures » on les désigne aujourd'hui par la locution « minéraux argileux ».

2° des roches où les minéraux argileux sont mêlés à d'autres minéraux. Ces « argiles » peuvent être des argiles résiduelles ou des argiles d'altération. Elles peuvent être aussi des « argiles sédimentaires ». On nomme ces dernières les *roches argileuses sédimentaires*, et elles sont l'objet de ce travail.

Le premier chapitre sera consacré :

1° à la définition de ce que l'on entend ici par milieu de genèse et conditions de sédimentation. En effet, les roches étudiées sont sédimentaires et les conditions de leur sédimentation est la base des interprétations futures.

2° à un bref résumé de la définition actuelle des minéraux argileux qui constituent pour une part le matériel étudié.

3° à une définition de ce que l'on entend par roches argileuses dans ce travail.

4° à l'histoire de nos connaissances sur la genèse des roches argileuses d'un point de vue géologique, histoire menée jusqu'au temps présent.

1. - Milieu de Genèse et conditions de sédimentation

Le but poursuivi est de rechercher une relation entre la constitution des roches argileuses et les conditions dans lesquelles elles sont nées. Si le premier effort fait souvent appel à des techniques minéralogiques ou pétrographiques qui seront discutées au cours des chapitres suivants, le second fait appel à des acquisitions classiques de la géologie dans ses recherches sur la paléogéographie et les faciès géologiques. On peut remarquer que le maniement de ces disciplines traditionnelles, n'est pas plus aisé que les autres plus récentes.

1° DÉFINITION DES TERMES UTILISÉS.

Une remarque préliminaire est nécessaire au sujet des locutions utilisées. Puisque la genèse des roches étudiées s'est faite dans des bassins de sédimentation, *milieu de genèse et milieu de sédimentation* d'une part, et *conditions de genèse et conditions de sédimentation*, d'autre part, sont des locutions équivalentes.

Il importe de distinguer, milieu de genèse et conditions de sédimentation. En effet, quand on dit que le milieu de genèse est la mer, le renseignement est important et précieux, mais il peut être précisé si l'on peut indiquer les conditions de sédimentation. Alors que le milieu pouvait se qualifier d'un mot, les conditions de sédimentation sont infiniment variées, difficiles à qualifier et souvent, en grande partie, inconnues quand il s'agit d'un sédiment fossile. Aucune explication de la genèse des roches ne peut être entreprise si l'on n'arrive pourtant à approcher leurs conditions de sédimentation. Les principaux milieux de genèse qu'on peut définir sont, les milieux marin, lagunaire et lacustre, qui seront étudiés ici. On peut y ajouter les milieux fluvial, estuarien, deltaïque, morainique, etc...

Pour chacun de ces milieux, les conditions de sédimentation doivent être précisées. Ce sont elles qui déterminent les innombrables faciès que peuvent prendre les sédiments nés dans un même milieu. On peut utiliser les critères pétrographiques. Exemple : faciès calcaire, marneux, détritique, oolitique, récifal, etc... On peut utiliser les critères paléontologiques, exemples : faciès neritique, benthique, pélagique, coralliaire, etc... Ces deux catégories d'indications se contrôlent mutuellement, et de l'ensemble on cherche à

reconstituer d'autres caractères types du milieu comme la profondeur des eaux, leur agitation, l'allure des courants, l'éloignement des côtes, et les qualités physico-chimiques du milieu. Le moins qu'on puisse dire est que cette reconstitution n'est pas facile. Quelques exemples sur des séries classiques le montrent.

A) Une controverse célèbre opposa, entre eux, les savants à la fin du siècle dernier au sujet de la craie. Les uns y voyaient un dépôt fossile analogue à la vase à Globigérines des mers actuelles qui est un dépôt de mer très profonde (plusieurs milliers de mètres). Les autres remarquant l'abondance des organismes de faible profondeur y voyaient un dépôt de mer plus près des côtes. CAYEUX (60) par l'étude minutieuse à la fois pétrographique et faunistique a montré que la craie est un dépôt de mer épicontinentale éloigné des côtes, donc pélagique, mais peu profond, donc benthique.

B) Il fut un temps où les sédiments argileux étaient considérés comme des dépôts profonds. Cependant, beaucoup d'entre eux, et en particulier les marnes bleues liasiques de Lorraine montrent une proportion d'organismes benthoniques qui obligent à préciser qu'il s'agit là de sédiments déposés à quelques décimètres de la surface.

C) La craie et les marnes du Lias ne se sont pas déposées à des profondeurs bien différentes. Les unes comme les autres sont des dépôts de plate-forme continentale montrant des émergences accidentelles avec des lits phosphatés et pourtant les deux faciès sont fort différents.

D) On a pu montrer que des sédiments argileux issus de vases pouvaient être peu profonds, même quand ils ne contiennent que des restes d'animaux pélagiques. C'est le cas de certains schistes à graptolites et de certains niveaux de marnes noires du Bassin de Paris qui ne contiennent que des Ammonites pyrileuses.

E) A l'opposé, par exemple, les marnes de la Fosse Vocontienne, du crétacé inférieur du S.-E. de la France, sont considérées comme profondes. A plusieurs reprises (VALANGINIEN-GARGASIEN) elles ressemblent beaucoup aux faciès marneux à ammonites pyrileuses du Jurassique du Bassin de Paris. Or qu'entend-on précisément par le mot « Fosse » alors que ce terme est réservé par les océanographes actuels aux abîmes de plusieurs milliers de mètres, où la sédimentation est presque nulle ? Aucun géologue n'a imaginé de telles profondeurs pour la Fosse Vocontienne. Par ailleurs, il est naturel de considérer ces dépôts comme profonds puisqu'ils passent vers le Sud et vers le Nord aux faciès plus littoraux des types provençaux et jurassiens. Mais on doit remarquer que la série « profonde » est seulement homogène au cœur de la fosse et que sur son pourtour elle s'intercale avec les faciès plus littoraux. On peut

difficilement concevoir les soubresauts du fond de la mer qui ont pu permettre en ces lieux périphériques l'alternance des dépôts littoraux avec ceux d'une « fosse ». En fait, la différence de profondeur devait être assez faible d'une période à l'autre et du bord au centre de la « fosse ». On peut imaginer un pays où continents et mers avaient un relief assez mou : la moindre dénivellation du plan d'eau changeait profondément la limite des rivages. Plus, sans doute, que la profondeur, la distance des côtes variait ainsi que l'alluvionnement venant des continents et le renouvellement des eaux *sur le fond*, renouvellement qui permet la vie aux animaux benthiques. Il n'est pas question ici de détruire légèrement l'ouvrage patient de dynasties de géologues mais de chercher à se représenter les phénomènes de la sédimentation. La « *dépression* » vocontienne est un fait. Il n'est pas sûr que sa profondeur ait dépassé quelques hectomètres. Plus profonde sans doute que la plate-forme jurassique du Bassin de Paris qui présente des sédiments semblables, elle n'en est cependant pas qualitativement différente au point de vue de la sédimentation tandis que toute appréciation bathymétrique à son sujet est encore aujourd'hui très difficile.

Ces quelques exemples montrent à quelles difficultés on se heurte quand connaissant le milieu de genèse d'un sédiment on amorce la reconstitution des conditions de sédimentation, et montrent aussi à l'évidence l'intérêt de la distinction précise de ces deux notions.

2° SÉDIMENTS ANCIENS ET ACTUELS. BATHYMÉTRIE ET ALLUVIONNEMENT.

Si aujourd'hui on veut caractériser les conditions de genèse d'un sédiment dans un certain milieu on est obligé de se livrer à un inventaire détaillé portant sur de nombreux points. Citons ceux qui paraissent les principaux en notant qu'ils ne sont pas indépendants les uns des autres : distance des côtes, profondeur des eaux, agitation, température, teneur en particules en suspension, teneur en sels ou en gaz dissous, pH, rH, caractères de la vie organique animale, végétale ou bactérienne.

Or, l'effort maximum de la géologie traditionnelle a cherché le plus souvent à classer les sédiments fossiles grâce à tous les critères pétrographiques et paléontologiques entrevus en catégories dépendant de la profondeur. Cette direction de recherche a été prise sous l'influence des campagnes océanographiques et surtout celles du siècle dernier qui avaient jeté quelques lumières sur les sédiments des mers actuelles. Sans prétendre que cette ligne de recherche est la seule qui ait été suivie, on peut dire qu'elle est très importante et on peut citer parmi tous les auteurs qui ont coopéré à ce mouvement, un auteur classique, HAUG (166), qui a jeté les bases d'une

classification bathymétrique des sédiments, et un auteur moderne, TERCIER (356), qui en a précisé bien des points.

TABLEAU N° I
ALLUVIONNEMENT ET SÉDIMENTATION
(d'après SONDER - 1946)

ACTIONS des EAUX	RELIEF	MOUVEMENT des EAUX	MODE de TRANSPORT	GROUPE de TRANSPORT	PRINCIPALES ROCHES	Rapidité moyenne de Sédimentation en année par mètre de sédiment
EROSION (Eaux troubles)	Fort	Fort	Trouble	Groupe S (Sable)	Sable Conglomérat Arkose	400 - 2.000
	Moderé	Moderé	Suspension	Groupe T (Ton)	Argile Marne	800 - 6.000
	Faible	Circulent légèrement	Bon Approvisionnement.	Groupe C (Kalc) sédimentation rapide	Dolomite Calcaire Sels.	2.000 - 10.000
DÉNUDATION (Eaux claires)			Approvisionnement déficient.	Groupe D sédimentation lente	Calcaire Marne Calc. Siliceux Argile Radiolarite	

En cherchant à utiliser cette méthode pour tenter une reconstitution des conditions de sédimentations des roches étudiées dans ce travail, on est parvenu à des contradictions décourageantes. En effet, la majorité des roches étudiées provient du Bassin de Paris.

L'ensemble s'est déposé dans une mer de plate-forme continentale, la profondeur restant faible, alors que les faciès y sont les plus divers. Même en recherchant quand c'est possible par les associations fauniques une précision supérieure à celle de l'hectomètre, on trouve des faciès fort différents pour des profondeurs voisines. C'est ce que montrera l'étude analytique de la deuxième partie, tenant grand compte des reconstitutions paléogéographiques possibles.

Il apparaît de plus en plus aux géologues que les faciès lithologiques, tout en dépendant des caractères propres aux bassins de sédimentation, dépendent autant sinon plus de l'alluvionnement, c'est-à-dire d'un phénomène compliqué où le relief du continent et la circulation des eaux à sa surface sont des facteurs majeurs.

Les travaux de SONDER (349) sont extrêmement suggestifs à cet égard. *SONDER recommande de se défier d'un parallèle entre les mers libres actuelles et les mers transgressives anciennes.* Et il tient un très grand compte de l'alluvionnement dans les mers épiconinentales anciennes pour expliquer les faciès lithologiques, réservant aux conditions bathymétriques une part intéressante, certes, mais une part seulement dans le mécanisme de la sédimentation. Afin de schématiser son raisonnement, SONDER a dressé un tableau tout à fait suggestif où interviennent pour déterminer la nature des sédiments, le relief du continent, les mouvements des eaux, etc... (Tableau I, d'après SONDER). C'est dans cette direction de recherche qui tient grand compte dans la sédimentation des mers épiconinentales de l'alluvionnement qu'on peut interpréter une des principales conclusions de GOLDSCHMIDT (123) à la suite de ses travaux géochimiques. Cet auteur remarque qu'au cours d'un cycle sédimentaire les phénomènes sont tels qu'ils aboutissent à une gigantesque analyse chimique semi-quantitative.

Le cycle sédimentaire complet et un peu idéal serait le suivant :

- 1° Résidus insolubles tels que sables et grès avec minéraux résistants (quartz et zircon).
- 2° Hydrolysats tels que les argiles et les shales, avec oxydes hydratés et hydrosilicates d'aluminium.
- 3° Oxydats (minerais de fer sédimentaires), oxydes et hydroxydes de fer trivalent.
- 4° Réducteurs comme le charbon, schistes bitumeux, sulfures sédimentaires.
- 5° Carbonates.
- 6° Résidus d'évaporation (chlorures, sulfates, borates, d'alcalins et d'alcalinoterreux).

Le nombre des séries sédimentaires qui reproduisent un tel

schéma sans manquer plus de deux ou trois étapes est considérable.

Quelques exemples peuvent en être fournis dans les séries suivantes qui sont parmi les plus familières. Les chiffres entre parenthèses représentent les diverses phases du schéma de GOLDSCHMIDT.

A) Permien Allemand. D'abord les Rothliegendes (1), puis les Kupferschiefer (2 et 4 superposés), puis le Zechstein (5) enfin le KEUPER salifère (6).

Le permien anglais est très semblable.

B) Le Trias Allemand. D'abord le grès bigarré (1), puis le Weltenkalk assez marneux (2) avec une période salifère précoce dans l'Anhydritgruppe, ensuite le Muschelkalk (5) très net et enfin le Keuper (6) salifère.

C) Le Jurassique de Lorraine. En le considérant d'une manière superficielle et dans son ensemble, le lias de Lorraine donne une belle série. Le grès Rhetien (1), les marnes liasiques (2), le minerai de fer de l'Aalenien (3). Les calcaires Bajocien Bathonien (5) représentent la suite de la série. Le faciès salifère manque.

D) Enfin le crétacé de l'Est du Bassin de Paris montre une physionomie analogue, dont nous choisissons la série en Haute-Marne et dans l'Aube. Crétacé inférieur détritique avec les sables valanginiens, barrémiens et le grès vert de l'albien (1). Puis les Marnes du Gault et les Marnes du Brienne (2), enfin les craies marneuses et les craies (5). L'émersion se produit sans épisode salin visible à la fin du crétacé.

La régularité de telles successions impose, à l'évidence, à l'esprit que c'est la nature des matériaux envoyés à la mer qui détermine pour une bonne part la sédimentation dans celle-ci. Après la période de surrection de la chaîne la sédimentation détritique domine et forme ces immenses surfaces de sable (Permo-trias, rhétien, grès vert). Puis l'érosion devient moins intense, le relief diminuant, et peuvent seulement parvenir à la mer les fines qui engendreront après remaniement chimique dans la mer les dépôts argileux. Le continent peut être considéré à ce moment comme arasé. C'est le moment où dans le schéma de GOLDSCHMIDT surviennent les minerais de fer sédimentaire. Je me demande depuis plusieurs années s'il ne faut pas en voir la cause dans les phénomènes de latéritisation. Supposons que l'Afrique actuelle soit surélevée de quelques décimètres, toute la carapace latéritique qui en recouvre de grandes surfaces passerait à la mer. On peut se demander si un tel mécanisme joint à un climat convenable n'est pas responsable des dépôts de minerai de fer oolitiques qui, comme le dit CAYEUX, correspondent à des ruptures d'équilibre et suivent chaque chaîne

de montagne. Je considère ceci comme une hypothèse que je signale ici incidemment. De toutes façons la période des érosions mécaniques étant close, l'érosion chimique est seule possible et c'est l'époque des carbonates. Ensuite les continents ayant abaissé leur relief en comblant les bassins de sédimentation, d'immenses lagunes saumâtres s'établissent où les dépôts salins se formeront. C'est de cette manière que j'interprète le cycle de GOLDSCHMIDT, en admettant toutes les interruptions ou les répétitions nécessaires pour rendre compte des faits. *L'érosion des continents apparaît sous ce jour comme le moteur de la sédimentation.* Et le spectacle immobile des continents actuels et des mers qui les entourent élimine cette variable au point de la rendre discrète dans les essais de reconstitution des milieux de sédimentation passés.

Ceci ne veut pas dire qu'en un bassin donné et à une époque donnée les autres variables n'aient pas joué et les conditions bathymétriques pour leur part. Mais elles semblent insuffisantes pour répondre à certaines questions comme la suivante qui me fut posée par M. PRUVOST, il y a quelques années : pourquoi le lias supérieur est-il partout argileux, non seulement dans la cuvette anglo-parisienne, mais dans le géosynclinal alpin ? En rechercher la raison dans des conditions bathymétriques uniformes est une possibilité. Mais elle est improbable et décevante.

On peut supposer au contraire que l'histoire subie par les chaînes hercyniennes, dans l'Ouest de l'Europe est commune. Au lias supérieur, leur érosion est telle que seules peuvent parvenir à la mer des boues fines. Celles-ci se déposent aussi bien sur les plate-formes continentales que dans les géosynclinaux en voie de formation. On peut d'ailleurs redire ici que les profondeurs de ces deux catégories de bassin sont peut-être beaucoup moins différentes qu'on ne l'imagine.

Déjà, grâce aux enseignements de P. PRUVOST lui-même, l'immense fosse indispensable pour recevoir les 1.000 mètres de la série liasique dauphinoise n'est plus nécessaire à envisager. Le même phénomène de subsidence est aussi manifeste en Lorraine que dans le Dauphiné, seule l'intensité varie. Pour ce qui est des profondeurs auxquelles les sédimentations s'effectuent, les associations fauniques permettent de supposer que celle du géosynclinal dauphinois est plus importante puisque les espèces benthiques y font défaut mais en l'absence de critère sûr, il n'y a aucune raison d'imaginer un écart plus grand que celui qui sépare 1 ou 2 hectomètres d'une part de quelques centaines de mètres d'autre part. Le rôle des conditions bathymétriques reste important pour interpréter les faciès littoraux relevés avec minutie par LORY aux abords du dôme de la Mure d'une part et par MOUTERDE près du Morvan d'autre part.

3° CHOIX DES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS.

Le choix des échantillons étudiés n'a pas été fait au hasard, mais en fonction des directions de recherche que je viens de résumer. En effet, pour pouvoir saisir les lois de la sédimentation s'il en existe, il fallait prélever des échantillons dans des gîtes sédimentaires dont on pouvait au moins partiellement reconstituer les conditions de genèse.

a) Les milieux de genèse retenus ont été les suivants : les milieux marin, lagunaire et lacustre. En effet, les conditions de genèse dans ces trois sortes de milieu, sans être toujours faciles à reconstituer peuvent être approchées.

b) Au contraire les milieux fluviaux, morainiques, estuariens et deltaïques sont tellement variés à la fois entre eux et dans le sein de leurs dépôts que toute recherche de loi statistique simple est illusoire.

Quelques exemples illustreront le raisonnement ainsi utilisé en même temps qu'ils montreront que le milieu de genèse ainsi que les conditions de sédimentation peuvent être définies, définissables ou indéfinissables.

1° Il existe en Lorraine dans le Keuper inférieur un gisement salifère. Des marnes forment dans les couches de sels une gangue stérile. La liaison entre le sédiment argileux et la roche saline est si intime qu'on a le droit de définir le milieu de genèse de cette marne en disant qu'elle est née en *milieu lagunaire sursalé*. Les conditions de sédimentation sont aussitôt *définies* comme celles qui règnent dans un bassin sursalé.

2° Il existe près de Rambervillers, dans une terre alluviale, quelques lentilles argileuses qui sont exploitées depuis fort longtemps comme terre à grès. Il est évident qu'il s'agit d'un dépôt fluvial. Mais ces lentilles sont étroites et courtes, mêlées à des dépôts alluviaux de toutes sortes. Le trajet parcouru depuis la chaîne des Vosges dont ils sont originaires est dérisoire. Que pouvons-nous dire sur les conditions qui ont présidé au dépôt, sur le pH, sur la teneur en cations ? Ne peut-on pas supposer que ce dépôt fut rapide, purement détritique et que les matériaux fins, descendus pendant un petit nombre de kilomètres, se sont déposés là sans avoir le temps de se plier aux obligations qu'en général un milieu de sédimentation défini impose à un dépôt ? Je dis, que dans ce cas, bien qu'on reconnaisse le milieu de genèse comme fluvial, les conditions de sédimentation *ne sont pas définies*; bien plus elles *ne sont pas définissables* car les conditions de sédimentation de dépôts fluviaux sont aussi variées qu'il est possible de l'imaginer.

3° Il existe en Lorraine dans l'étage Rhétien une formation appe-

lée « marnes de Levallois ». Elle se trouve au sommet du Rhétien et sa présence est constante sur des dizaines de kilomètres. Les géologues ne sont pas d'accord pour en expliquer la genèse. Les uns y voient une récurrence des conditions lagunaires de sédimentation du Keuper; les autres, une première manifestation de la sédimentation marine du Lias. Des hypothèses intermédiaires peuvent être faites. Dans ce cas, je dis que *le milieu et les conditions de sédimentation ne sont pas définies mais sont définissables*. Elles le seront peut-être plus tard par la découverte de nouveaux critères.

Autant que possible, et d'une manière générale, on a étudié dans ce travail des niveaux sédimentaires argileux dont *les conditions de sédimentation sont bien définies*. Ceci est indispensable si l'on veut parvenir à raisonner les coïncidences entre ces conditions de formation et la constitution des roches. On peut ainsi espérer découvrir les lois.

Par contre, d'une manière systématique à l'exception d'un ou deux échantillons curieux par ailleurs, les affleurements argileux dont les conditions de sédimentation *sont indéfinissables* ont été éliminés. Tels sont les moraines, dépôts deltaïques, terrasses et toutes les boues mécaniques qui se sont formées fortuitement sans qu'on puisse savoir sous quelles influences elles pourraient avoir évolué. Leur analyse révèle les mélanges les plus divers où aucune règle ne peut être précisée, surtout à l'heure actuelle.

Toutes ces précautions dans les définitions n'apparaîtront pas verbales dans l'exposé des faits de la deuxième partie. L'exemple des marnes de Pechelbronn comparé à celui des marnes bleues marines le montre : ces deux sortes de roches sont nées dans des milieux *différents*, l'un marin et l'autre lagunaire, les conditions bathymétriques sont *différentes*. Pourtant les conditions de sédimentation de la vase originelle devaient être *semblables* et l'étude pétrographique montrera *de fait*, des constituants argileux *semblables*. Le phénomène de la *convergence* si fréquent dans la nature joue ici d'une manière fort instructive.

4° ÉTUDE DE QUELQUES CARACTÈRES DES MILIEUX DE SÉDIMENTATION ÉTUDIÉS.

Parmi les innombrables variables de chacun des milieux de sédimentation étudiés et qui permettraient d'en préciser les conditions de sédimentation, certaines me sont apparues particulièrement saillantes. Cette revue les énumérera dans l'ordre des milieux successifs.

A. — Le milieu marin.

Le milieu marin se définit bien clairement. Il est des plus carac-

téristique par sa constance sur laquelle les spécialistes de l'eau de mer insistent (HARVEY 164). Cependant les dépôts marins sont variés, ce qui prouve des conditions de sédimentation changeantes. Dans la recherche des variations des conditions de sédimentation on doit tenir compte des facteurs bathymétriques, de l'alluvionnement, lié à la paléogéographie des mers et des continents, ainsi qu'on y a insisté précédemment. Je pense aussi qu'il faut tenir compte des conditions qui règnent soit dans la boue, soit dans la vase (BOURCART et Francis BOEUF 31) en train de déposer. Les études minutieuses qui ont été faites sur les vases actuelles (Francis BOEUF 115) ont montré qu'elles constituent un milieu tout à fait original par rapport à la mer qui les surmonte. Des mesures précises ont montré sous une couche superficielle, des conditions organiques et physico-chimiques tout à fait originales, et en particulier un rH très bas. Or le milieu de genèse du sédiment est autant celui de ces boues et de ces vases que celui de la mer elle-même. Ceci peut d'ailleurs être étendu à d'autres milieux. Ainsi, dès le départ, l'étude du milieu marin nécessiterait du point de vue de la sédimentation l'étude de la mer d'une part et l'étude du milieu intérieur des vases d'autre part. Certains dépôts agités sont en équilibre avec la mer. D'autres comme la vase résistent mécaniquement aux courants qui entraînent les galets et sont physicochimiquement presque isolés de la mer. Il y a là une distinction très féconde pour l'étude des sédiments fossiles.

Quoi qu'il en soit, les principales variables qui peuvent caractériser des conditions de sédimentation dans les divers milieux marins sont les suivants :

1° *Le pH.* — On appelle réserve alcaline de l'eau de mer, l'excès de radicaux basiques sur les acides forts. Cette réserve alcaline est en équilibre avec des radicaux d'acides faibles qui sont principalement CO_3H , CO_3 , BO_3H_2 . L'ensemble communique à la mer une réaction basique. Le pH de la mer est compris entre 7,8 ou 7,9 et 8,3 ou 8,4.

Ce pH peut varier sous l'influence de différents facteurs. Une augmentation de la pression fait varier l'équilibre entre le gaz carbonique et les bicarbonates. Le CO_2 total augmente, la réserve alcaline aussi, les bicarbonates aussi, le CO_2 libre diminue. Au total il se réalise une diminution sensible du pH (HARVEY 164).

On a mesuré le pH en différents points de la mer (LEGENDRE 231, HARVEY 164, FRANCIS BOEUF 114). En Méditerranée, et dans le Sud Atlantique : 8,35. Au large du Portugal : 8,25 en surface et 7,95 aux grandes profondeurs. Grandes profondeurs de l'Atlantique : 7,87. Mer Baltique : 8. Mer Noire : 7,27. Le pH varie sur les littoraux en fonction de la nature du fond : 8,3 sur fond

rocheux, 7,4 sur roches couvertes d'algues, 7,1 sur la vase. Cette dernière donnée numérique bien qu'isolée est d'un intérêt considérable ici ainsi que celle qui concerne la Mer Noire. En effet ceci montre que le pH des vases où les actions réductrices sont si importantes accuse une baisse notable du pH.

2° *La présence de carbonate de chaux.* — Les géologues admettent volontiers que la sédimentation calcaire est plus abondante près des côtes et à faible profondeur que loin des côtes et aux grandes profondeurs. A l'heure actuelle, les dépôts carbonatés se font surtout (FRANCIS BOEUF 115) dans les mers chaudes tropicales et subtropicales. Les boues blanches à globigérines tapissent des surfaces considérables dans l'Atlantique et à des profondeurs qui sont souvent de plusieurs milliers de mètres. D'autre part, sur la répartition des dépôts carbonatés dans les fonds marins les campagnes océanographiques ont donné des résultats contradictoires avec les océans prospectés. Puisque rien de net n'apparaît, il faut croire que plusieurs facteurs jouent concurremment comme les exemples élémentaires suivants l'indiquent. La profondeur est un élément important pour la genèse des roches calcaires formées d'organismes vivant sur le fond. A cette obligation s'ajoute celle de la température et de la pureté des eaux pour les récifs construits. Seul, ce dernier critère semble prépondérant pour les boues coralliaires carbonatées. On voit qu'avant de déduire de la présence de faciès calcaires dans un niveau des reconstitutions bathymétriques, plusieurs précautions sont à prendre.

Du côté des réactions physico-chimiques, la zone de pH alcalin nécessaire à la précipitation du carbonate de chaux a été précisée (LUCAS 249). Par ailleurs un mécanisme de la dolomitisation des sédiments calcaires a été reconstitué : il nécessite un pH très alcalin et une agitation sensible des eaux (RIVIERE 328). Il n'est pas sans intérêt de remarquer que dans les séries marines étudiées, plus une marne est pyriteuse et foncée par la présence des sulfures, moins elle est calcaire. Il y a une certaine incompatibilité entre le milieu réducteur des vases et la progression des carbonates. On a déjà vu le pH baisser sensiblement à proximité des vases et la précipitation des carbonates est gênée d'autant.

3° *La présence des sulfures.* — Il existe trois sulfures principaux dans les sédiments et en particulier dans les sédiments argileux (TWHENHOFEL 367). L'un est un colloïde hydrophile noir : l'hydrotroïlite (monosulfure hydraté : $\text{FeS} \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Il contribue avec les matières organiques à donner aux sédiments une couleur foncée. Il est probable qu'il alimente la néoformation de la pyrite et de la marcassite. Ces deux sulfures sont deux variétés de même composition (FeS_2), on admet que l'hydrotroïlite se forme au cours de

sédimentation, la néoformation des autres se faisant aussitôt mais pouvant se poursuivre au cours de la diagénèse. Il est démontré que les phénomènes bactériens anaérobies sont à l'origine de ces néoformations avec l'apparition du H_2S dans la chaîne des réactions ainsi que l'odeur des boues le révèle. L'anaérobiose empêche le développement des organismes qui déposent les substances organiques et au contraire favorise la pullulation des bactéries anaérobies parmi lesquelles on compte les bactéries sulfureuses. L'ensemble du phénomène nécessite un renouvellement des eaux, faible ou nul, et ceci est important au point de vue de la paléogéographie.

Les roches sédimentaires contenant des sulfures et en particulier de la pyrite sont nées dans un milieu réducteur. La circulation des eaux est nulle ou limitée sur le fond. Ceci ne peut empêcher la vie de se développer à la surface et les débris organiques peuvent venir se sédimenter au fond. Il est même possible d'imaginer des hécatombes d'animaux nageurs dans les mers putrides qui expliqueraient l'abondance des céphalopodes dans certains de ces niveaux. De telles conditions réductrices, sur le fond, peuvent se réaliser dans certaines lagunes fermées, dans les bas fonds qui ne sont pas balayés par les courants et d'une manière générale et beaucoup plus fréquente sous la couche superficielle des Vases où le milieu est réducteur (FRANCIS BOEUF 115). Ce point paraît important car le milieu intérieur des vases sous la pellicule superficielle peut être fort différent de la mer qui la surmonte. On doit noter qu'un pH de 7,1 a été mesuré dans la mer au-dessus d'un fond vaseux et que le pH de la Mer Noire est de 7,27. Chacun sait que la Mer Noire est sulfureuse et ceci montre à quel point les équilibres de la mer peuvent être modifiés en un tel milieu. On y trouve un pH neutre et une réserve alcaline basse.

Ceci montre que si la présence de carbonates abondants impose un pH franchement basique, la présence de sulfures abondants abaisse le pH et favorise par conséquent l'élimination des carbonates du sédiment. On voit à nouveau la rivalité de facteurs apparaissant indépendants. On verra l'utilité de telles reconstitutions.

Les échantillons marins choisis pour cette étude sont de plusieurs types. D'abord le calcaire argileux où la phase carbonatée est la plus importante possible et qui semble correspondre à l'évolution d'une boue calcaire. Ensuite toute une variété de marnes noires, bleues ou grises si familières au stratigraphe dans les séries marines. On y trouve souvent des fossiles pyriteux, toujours des concrétions pyriteuses. On a cherché à avoir des échantillons de teneur en carbonates variés. On peut ajouter l'échantillon glauconieux si caractéristique du milieu marin.

B. Le milieu lagunaire.

Les échantillons lagunaires ont été choisis dans les séries de marnes bariolées du Trias en Lorraine : Muschelkalk moyen et Keuper. Par ailleurs, j'ai recherché des échantillons venant de gîtes sursalés divers — bassin potassique d'Alsace — gypse du bassin de Paris — Chott es Chergui du Sud Oranais — terre à foulon liée aux gypses du Djebel Ghassoul, etc...

Le milieu lagunaire est moins bien connu encore que le milieu marin. Dans son ensemble, il est caractérisé par la naissance possible en son sein de sels figurés. La liste des sels qui ont été trouvés dans la nature est considérable. Parmi eux sont de beaucoup les plus importants le sel gemme ou halite ($NaCl$) et le gypse ($SO_4Ca \cdot 2H_2O$). Puis vient l'anhydrite (SO_4Ca). La bibliographie distingue de nombreux types de lagunes (TWENHOFEL 367, FINATON 109, 110, 111, DEICHA 81, 82, BLAYAC 23 bis) que l'on peut résumer ainsi selon FINATON :

- A) Bassin continental avec ou sans affluent d'eau douce.
- B) Bassin communiquant avec la mer avec ou sans affluent.
- C) Bassin fermé avec affluent d'eau salée.

Les conditions physicochimiques régnant dans ces différents milieux sont variées à l'infini et mal connues. Les types de sels trouvés dans les dépôts actuels aussi bien que fossiles sont les plus divers (TWENHOFEL 367). Un pH de 9,2 a été relevé dans un marais salant. Il est pourtant utile de remarquer que la majorité des sels déposés dans les lagunes sont des sels d'acides et de bases fortes. Le pH des solutions de ces sels est voisin de la neutralité : ce n'est donc pas la sursalure qui risque de modifier le pH d'une lagune mais encore une fois l'équilibre des ions d'acides faibles avec la réserve alcaline. On manque d'indications à ce sujet.

Pour partager entre les différents milieux lagunaires fossiles dont les dépôts sont étudiés ici, je me suis tenu à des distinctions fort simples mais qui, prudentes, ne préjugent de rien qui ne soit effectivement observable. Les principaux types sont les suivants : Lagunes sursalées, lagunes non sursalées, lagunes magnésiennes.

D'autres variations peuvent encore survenir :

1° Dans une lagune en liaison avec la mer, l'invasion saisonnière de celle-ci peut à un moment faire régner des conditions marines, ou proches des conditions marines.

2° Dans une lagune séparée de la mer, le jeu de la concentration des sels n'a aucune raison de ne pas s'établir, saisonnièrement ou pour une période assez longue au voisinage de celui de la mer. On aura alors une convergence entre deux milieux qui pourtant sont différents.

3° Enfin les géologues ont réuni sous le terme de milieu lagunaire des bassins de sédimentation, à la vérité, fort différents. Parmi eux, certains sont isolés de la mer, mais peuvent évoluer à une certaine époque en lagune vaseuse : une accumulation de matières organiques se fait en milieu anaérobie. On verra réintervenir les matières organiques et les sulfures et une convergence avec le milieu vaseux marin s'établir.

C) *Le milieu lacustre ou fluviolacustre.*

Le milieu lacustre est susceptible, s'il est possible, de variations encore plus grandes que les précédents. Les eaux courantes sont extrêmement variables par leur origine et par les terrains qu'elles traversent et venant se verser dans une surface déprimée, elles vont lui imprimer des caractéristiques qui créeront une grande variété de types dans les conditions de sédimentation.

Parmi eux on peut arbitrairement distinguer quelques grands types :

a) *Le complexe fluviolacustre de Piedmont.* — Au pied d'une chaîne en voie d'émersion, une aire de piedmont fluviolacustre s'installe. Les eaux de ruissellement originaires des massifs de roches silicatées qui constituent la chaîne sont connues des hydrologues, elles sont agressives et acides. Pauvres en cations, elles contiennent du CO_2 libre. Les eaux circulent vite, elles sont oxygénées et l'ensemble correspond à un grand lessivage par des eaux acides et agressives.

Un très bel exemple d'une telle formation a été reconstitué minutieusement dans le Wealdien du Hainaut par MARLIÈRE (261-262-263). Il s'agit d'un énorme cône de déjection fluviolacustre. A une plus grande échelle encore SCHOELLER a décrit le complexe fluviolacustre de Piedmont qui à l'Eocène supérieur a engendré l'ensemble des dépôts du sidérolitique. L'avalanche de produits mécaniques originaires du Massif Central a permis en des lieux momentanément calmes l'accumulation de lentilles argileuses. Par un raisonnement serré, SCHOELLER a reconstitué les qualités des eaux au cours de cette sédimentation particulière. Elles sont acides, oxydantes et agressives (346-347).

b) *Le lac acide.* — Il arrive que dans un lac les eaux soient acides, soit à cause du bassin d'alimentation de celles-ci, soit à cause d'une végétation lacustre qui entretient par le dégagement de CO_2 et par la genèse des acides humiques un milieu acide. Les cations peu nombreux qui peuvent survenir dans un tel milieu entrent aussitôt en combinaisons solubles et sont éliminés. Un faciès extrême de ce type est la tourbière dont on connaît l'acidité et

l'agressivité des eaux. Le bassin de Provins illustre parfaitement un cas intermédiaire entre le précédent et celui-ci.

c) *Le lac calcaire.* — Quand le renouvellement des eaux d'un lac n'est pas suffisant vis-à-vis de son alimentation en carbonates, l'équilibre de ceux-ci peut ressembler à celui de la mer. Il apparaît une sédimentation carbonatée. Les dépôts qui se forment alors sont extrêmement différents des précédents dans leur nature même en raison de la présence des carbonates et ceux-ci caractérisent le milieu suffisamment. La présence de fossiles calcaires vient illustrer les propriétés d'un tel milieu.

d) *Lacs saumâtres et lagunaires.* — Il y a toutes les possibilités théoriques pour que les sels s'accumulent dans un lac dépassant la teneur normale et lui communiquent un caractère plus ou moins lagunaire. Un apport salin important combiné avec une évaporation élevée et un exutoire insuffisant pour les produits solubles, transformera le lac en une lagune continentale, ce qui ramène aux types lagunaires étudiés précédemment. On saisit ici que la limite entre le régime lacustre et le régime lagunaire est aussi imprécise que celle du domaine marin avec les lagunes sursalées qui en dépendent.

CONCLUSION

Tel est l'état d'esprit dans lequel les sédiments étudiés dans ce travail ont été choisis. Ils furent prélevés dans des milieux de genèse divers, mais une grande attention est accordée aux conditions de sédimentation régnant dans ces milieux. Ces derniers peuvent varier beaucoup et ne pas être indifférents vis-à-vis du matériel sédimenté.

II - Les Minéraux argileux

Ce travail est fait par un géologue cherchant à reconstituer les lois qui président à la genèse d'un groupe de roches. Argileuses, ces roches contiennent avec les éléments propres à toutes les roches sédimentaires une partie qui est spécifiquement argileuse. J'ai nommé cette « fraction proprement argileuse » la « *phase argileuse* » extraite des roches sédimentaires. Pour la déterminer les données actuelles sur la minéralogie des minéraux argileux ont été utilisées. Elles sont, dans ce chapitre, brièvement résumées. D'abord parce que le lecteur « géologue » qui n'est pas familier de la Minéralogie, y trouvera la base des déterminations. Ensuite, parce que ces déterminations sont faites en fonction de l'état actuel des connaissances minéralogiques. Celles-ci varient vite. Dans quelques mois ou quelques années elles peuvent être modifiées. L'interprétation d'un tel travail, même en le supposant correct, ne sera valable qu'en fonction des bases minéralogiques que j'ai utilisées, c'est pourquoi j'ai cru bon de les présenter.

Ce résumé sera limité à ce qui est utile pour exposer plus loin les déterminations faites et les raisonnements géochimiques de la troisième partie.

A) LE GROUPE DE LA KAOLINITE.

La Kaolinite (GRUNER 155, BRINDLEY 46) est un silicate d'alumine hydraté. Seuls Si, Al, H et O interviennent dans sa composition. La formule chimique donnée en notation dualistique est : $2\text{SiO}_2, \text{Al}_2\text{O}_3, 2\text{H}_2\text{O}$.

La structure correspond au schéma suivant du feuillet élémentaire : 1° Une couche de tétraèdres d'oxygène à centre de silicium, toutes les bases des tétraèdres étant sur un même plan et les pointes tournées du même côté de ce plan. 2° Une couche d'octaèdres d'oxygène à centre d'Aluminium, les pointes libres des tétraèdres coïncidant avec certains sommets d'octaèdres. 3° Certains oxygènes sont remplacés par des OH. La formule structurale est $(\text{OH})_4\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5$ ou mieux :

	6 O
Couche tétraédrique	4 Si
Sommets communs	4 O, 2 OH
Couche octaédrique	4 Al
	6 OH

L'ensemble réalise un feuillet de 7 Å environ d'épaisseur.

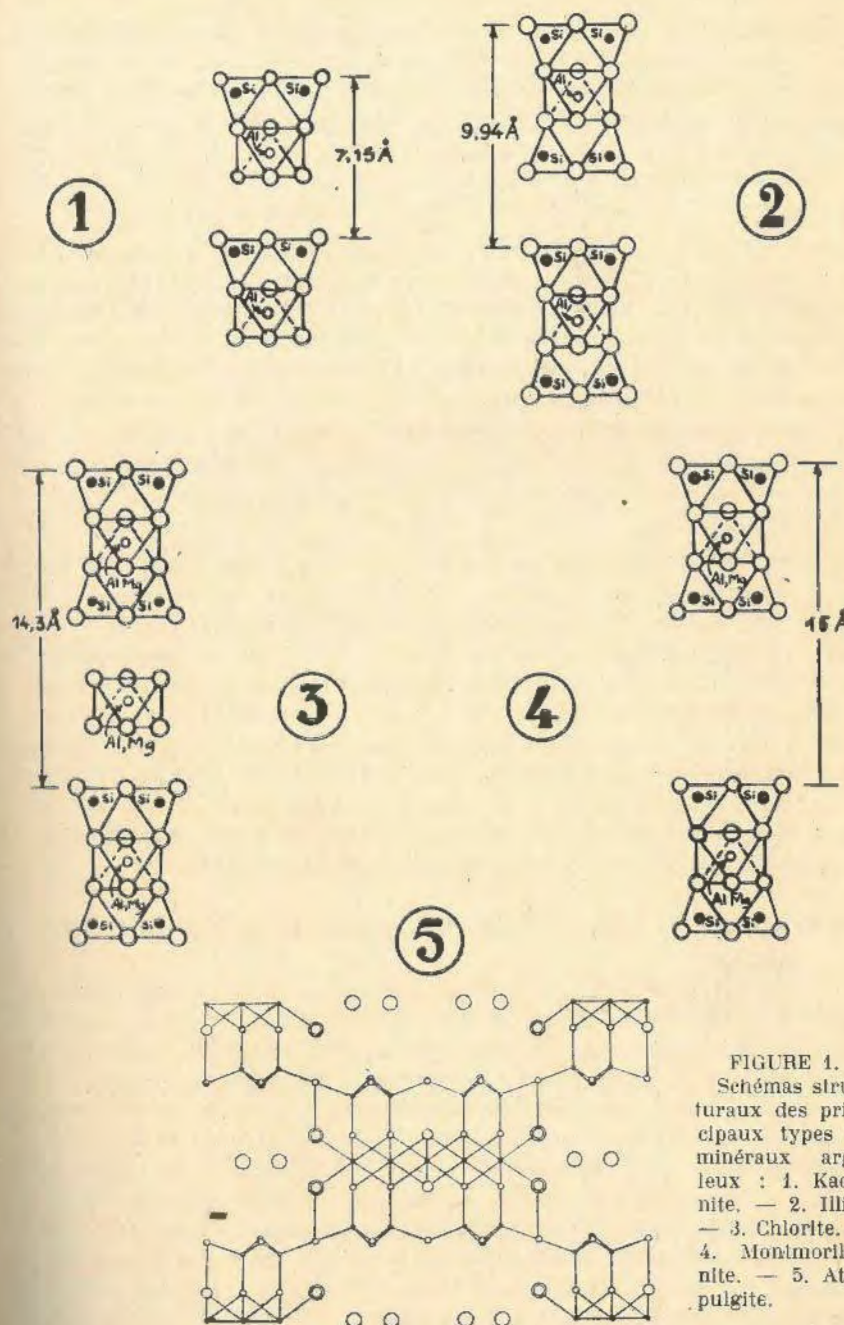


FIGURE 1.
Schémas structuraux des principaux types de minéraux argileux : 1. Kaolinite. — 2. Illite. — 3. Chlorite. — 4. Montmorillonite. — 5. Attapulgite.

Le spectre de poudre de Kaolinite donne les raies principales très fortes suivantes : 7,1 Å (002), 3,58 Å (004), qui sont caractéristiques et disparaissent après chauffage à 530°. L'analyse thermique révèle un départ de l'eau hygroscopique à 150°, un crochet endothermique vers 530° très accusé et en forme de V; enfin un crochet exothermique à 1.000°. Le microscope électronique montre que le minéral est formé de plaquettes hexagonales bien limitées.

HALLOYSITE. — L'halloysite est en quelque sorte une Kaolinite hydratée. Des feuillets extrêmement ténus de Kaolinite sont écartés les uns des autres par une couche d'eau. Le spectre de Rayons X donne 10 Å mais une légère déshydratation à 50° ou en atmosphère sèche ramène la raie à 7,4 Å en donnant la métahalloysite voisine de la Kaolinite.

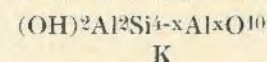
REMPLACEMENT ISOMORPHIQUE. — Dans beaucoup de minéraux argileux il peut y avoir remplacement isomorphique d'un cation par un autre. Ceci ne semble pas possible pour la Kaolinite (HENDRICKS 176).

ISOTYPIE. — Un minéral est isotype d'un autre (BILLIET 23) quand ayant la même structure, un des cations est remplacé par un autre. L'isotype ferrique de la Kaolinite est la Cronstédite, très rare; l'isotype magnésien, le chrysotile. A cause de son habitus fibreux BRAGG et WARREN (38) avaient proposé une structure en chaîne. J. DE LAPPARENT (214) en 1938 montra qu'on avait affaire à une structure phylliteuse et que le chrysotile était l'équivalent magnésien de la Kaolinite. Depuis WARREN (387) et ARUJA (6) ont adopté ce point de vue. C'est à la taille de l'ion Mg que le réseau doit de ne pouvoir se développer dans un plan. D'où l'allongement considérable de l'édifice cristallin dans une direction.

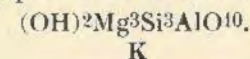
B) LE GROUPE DES MINÉRAUX ARGILEUX VOISINS DES MICAS.

a) **LES MICAS.** — La structure des micas a été établie par les travaux de MAUGUIN (278) et PAULING (322). On peut rendre compte de la manière suivante de la structure du feuillet élémentaire de la muscovite. 1° Une couche octaédrique d'oxygène à centre d'Al est comprise entre deux couches tétraédriques à centre de silicium. 2° Un silicium sur quatre est remplacé par un Al dont le diamètre ionique est voisin. Il se crée alors un déficit de valence pour le feuillet. 3° Ce déficit est comblé par des gros ions K qui sont situés entre les feuillets et qui assurent la liaison entre ceux-ci. C'est à cette structure que les micas doivent de ne pas avoir les propriétés argileuses car les feuillets sont « tenus » entre eux par les ions K et ne peuvent glisser les uns sur les autres.

La formule structurale de la muscovite est :



mais la muscovite n'est qu'une espèce de la famille des micas. On peut y opposer la phlogopite dont la formule structurale est



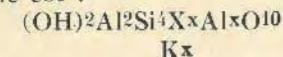
On voit qu'on déduit la formule de la phlogopite de celle de la muscovite en remplaçant en isovalence Al^2 par Mg^3 . La phlogopite est l'isotype de la muscovite. C'est WINCHELL (388 bis) qui a défini parmi les micas, les deux séries heptaphyllite et octophyllite dont les types sont la muscovite et la phlogopite. Dans la première, les deux tiers des positions octaédriques sont occupées par 2 ions trivalents, dans la seconde toutes les positions octaédriques sont occupées par 3 ions divalents. On parle aujourd'hui de la série dioctaédrique pour les micas heptaphyllites, et trioctaédriques, pour les octophyllites (STEVENS 351). Ces distinctions sont importantes pour la compréhension des minéraux bâtis sur le type mica y compris les montmorillonites.

Le schéma structural des deux types de mica est le suivant :

Muscovite	Phlogopite
K Ion intercalaire	K
6 O	6 O
3 Si, 1 Al Couche tétraédrique	3 Si, 1 Al
4 O, 2 OH	4 O, 2 OH
4 Al Couche octaédrique	6 Mg
4 O, 2 OH	4 O, 2 OH
3 Si, 1 Al Couche tétraédrique	3 Si, 1 Al
6 O	6 O
K Ion intercalaire	K

b) **L'ILLITE.** — Proposée par GRIM, BRAY ET BRADLEY (129), comme nom de groupe, ce terme désigne l'ensemble des minéraux argileux ayant une structure voisine de celle du mica Muscovite.

La formule structurale est :



x varie de 0,5 à 0,75. On voit que moins d'un silicium sur 4 est remplacé par de l'aluminium. Un remplacement isomorphique de l'Al octaédrique par les ions Mg , Fe^{3+} et Fe^{2+} est fréquent. On ignore encore quantitativement jusqu'à quel point ces remplacements sont possibles, d'autant qu'on n'est jamais sûr de la pureté de l'échantillon argileux analysé. Il est possible que ces remplacements soient

la cause de la taille réduite des cristaux d'illite. D'autre part, on voit que par un jeu modéré de la substitution d'Al à Si, le potassium est moins abondant que dans le mica. La liaison entre les feuillets faiblit et les propriétés argileuses apparaissent. L'illite est essentiellement heptaphyllite et les isotypes octophyllites de l'illite sont à rechercher du côté des hydrobiotites et vermiculites.

Aux Rayons X, les raies principales données par l'illite sont les suivantes : 10 - 5 et 3,34. Elles sont très caractéristiques surtout dans les spectres orientés. Par l'analyse thermique différentielle, les courbes ne sont pas extrêmement fidèles. En général on a remarqué un double crochet endothermique entre 500° et 640° (50), mais l'un d'eux peut être absent. On observe ensuite un faible accident exothermique entre 850° et 1.000°. Le microscope électronique révèle pour l'illite, une forme en plaquette.

c) GLAUCONIE. — GRUNER (157) a montré que la glauconie appartient au groupe des micas, ce qui fut confirmé par MAEG-DEFRAU et HOFMANN (256). Déjà THIEBAUT (362) dans son étude sur la bravaisite avait remarqué une analogie chimique entre celle-ci et la glauconie. J. DE LAPPARENT (212-213) l'incorporait à la grande famille des minéraux bâtis sur le type mica. La glauconie est un minéral micacé heptaphyllite dans lequel le Fer ferrique remplace pour une part importante l'aluminium. La quantité de potassium pour 4 silicium varie de 0,5 à 1 selon le remplacement de Si par Al. La moyenne pour ce chiffre, sur 52 analyses de HENDRICKS et ROSS (175), est de 0,842.

d) LA QUESTION DE LA SYNONYMIE POUR LES MINÉRAUX ARGILEUX DU TYPE MICA. — Les minéraux argileux bâtis sur le type mica reçurent différents noms au cours des 70 dernières années. Les définitions en furent plus ou moins précises avec les époques successives et il est possible d'hésiter sur le nom de famille et d'espèce à adopter. Les principaux noms proposés sont les suivants : Bravaisite en 1878 par MALLARD (260), Hydromuscovite par JOHNSTONE en 1889 (187), Hydromica par GALPIN en 1932 (117), « Potash bearing clay » par ROSS et KERR en 1931 (338), « Sericite like mineral » par GRIMM et ses collaborateurs en 1935 (126 et 127), « Glimmerton » par EINDELL, HOFMANN et MAEG-DEFRAU en 1935, enfin, en 1937, Illite par GRIMM, BRAY et BRADLEY (129) et Attapulgitite au sens large par J. DE LAPPARENT (211, 213).

GRIMM, BRAY et BRADLEY en proposant le terme d'illite ont discuté la nécessité de la création de ce nom nouveau (129). Ils ont énuméré les inconvénients de la plupart des termes cités ci-dessus. Ils n'ont pu discuter la synonymie avec le terme d'Attapulgitite que

proposait J. DE LAPPARENT à la même époque dans son sens large et n'ont pas examiné la question de la synonymie avec la Bravaisite.

La première question a un intérêt purement historique mais est intéressante pour les chercheurs de langue française et nécessite un commentaire qui se révélera utile dans la troisième partie. La famille des attapulgitites fut conçue par J. DE LAPPARENT. Ce savant avait déterminé un minéral argileux curieux dans une argile bentonitique d'Attapulgis en Georgie, USA (207). Ce minéral nommé attapulgitite se caractérisait par un espacement basal d'environ 10 Å aux Rayons X. Les spectres de poudres de bravaisites donnent un espacement analogue et J. DE LAPPARENT fut amené à concevoir la grande famille des « Attapulgitites » au sens large (211-213). Cette famille comprenait 1° les palygorskites et les sépiolites fibreuses, 2° les attapulgitites sensu stricto quand $0,1 < x < 0,3$ (x désignant la quantité de K dans une formule structurale en Si_4O_{10}), 3° les bravaisites quand $0,3 < x < 1$, et 4° les glauconies quand le fer ferrique y devient important. Mais l'assimilation de la structure des palygorskites et des sépiolites à celle d'un mica ne fut pas admise par tous, et en particulier ne le fut pas par H. LONGCHAM-BON et MIGEON (240-242-287). En fait BRADLEY (35) a proposé plus tard une structure plus satisfaisante non micacée. Le caractère fibreux des attapulgitites vis-à-vis des micas, n'est donc pas, dans l'état actuel des choses, analogue à celui du chrysotile vis-à-vis de la Kaolinite. Il correspond à une différence de structure. La famille des attapulgitites au sens large disparaît et se coupe en deux groupes; celui des micas : illites, bravaisites, glauconies, et celui des attapulgitites, palygorskites et sépiolites, qui sont fibreuses et ont une structure en chaîne.

Il ne reste plus en conflit que les termes de bravaisite et illite. Le premier a une antériorité considérable puisque MALLARD le définit en 1878 (260). Une définition aussi ancienne ne put être pratiquée que sur la foi de l'analyse chimique; malgré cela, si les espèces se révèlent identiques, la loi d'antériorité joue en faveur de la bravaisite. Ce fut l'opinion de plusieurs auteurs, en particulier de FLEISCHER (112), ROSS (341) et RIVIERE (330 bis). Cependant, GRIMM et ROWLAND (150), NAGELSCHMIDT (306) et BRADLEY (36), ont démontré successivement par les techniques aux Rayons X et les analyses thermiques que la Bravaisite était un édifice à couches mêlées de montmorillonite et d'illite. GRIMM et BRADLEY (153) viennent d'insister sur ce point. La bravaisite n'étant pas reconnue comme une espèce minérale, n'a plus qu'un intérêt historique.

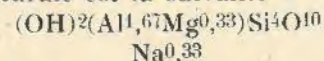
En conclusion de cette discussion, il semble que, comme le pro-

posaient GRIMM, BRAY et BRADLEY en 1937 le terme d'illite soit le meilleur pour qualifier un groupe de minéraux argileux du type heptaphyllite en attendant qu'on puisse y distinguer des espèces différentes, si elles existent.

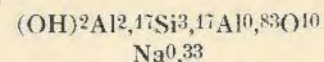
C) LE GROUPE DE LA MONTMORILLONITE.

a) LA MONTMORILLONITE TYPE. — La structure d'une Montmorillonite type se déduit facilement de celle du mica. Le feuillet est analogue : une couche octaédrique comprise entre deux feuillets tétraédriques. Il n'y a pas de remplacement de Si par Al dans les tétraèdres. Par contre, il existe un fréquent remplacement isomorphique en position octaédrique de Al par Mg, ceci créant un déficit de valence compensé par un ion extérieur au feuillet qui se trouve être le plus souvent du sodium.

La formule structurale est la suivante :



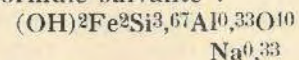
b) LA BEIDELLITE. — Un remplacement du silicium par l'Aluminium est ici réalisé et il définit la beidellite. L'échantillon de ce minéral où l'on connaît ce remplacement maximum est le suivant (HENDRICKS 174) :



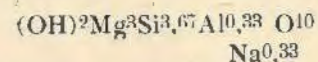
L'ion Na vient compenser le déficit de charge dû à la présence de l'Al tétraédrique. Cette compensation insuffisante est complétée par l'excès de charge octaédrique. En effet, l'excès d'Al octaédrique correspond à $0,17 \times 3 = 0,51$ valence à satisfaire. En les ajoutant aux 0,33 valence du Na on obtient 0,84 et l'équilibre est assuré. Il existe toute une série continue Beidellite Montmorillonite (ROSS HENDRICKS 340, WINCHELL 389).

c) NONTRONITE. — Dans toute la série Beidellite Montmorillonite le fer ferrique peut remplacer l'aluminium. On arrive à la Nontronite qui se trouve donc « isomorphe » de la série « isomorphe » beidellite montmorillonite.

On parvient à la formule suivante :



d) ISOTYPE-SAPONITE. — Si 2 Al sont remplacés par 3 Mg en isovalence on arrive à l'isotype dont la formule structurale est la suivante :



La saponite se trouve donc être l'isotype octophyllite ou tri-octaédrique de la Montmorillonite (ROSS et HENDRICKS 340).

e) ECHANGE DE BASE. — Contrairement à ce qui se passe pour les ions K du mica et des illites, les ions Na de la Montmorillonite peuvent s'échanger facilement avec d'autres cations. C'est le phénomène de l'échange de bases très caractéristique du groupe et qui explique un grand nombre des propriétés des terres à Montmorillonite (bentonites commerciales). Les remplacements entre cations peuvent se faire dans l'ordre suivant : Li Na H K Mg Ca Sr Ba Rb. Ainsi des cations différents peuvent se trouver liés aux particules montmorillonitiques et se remplacer les uns les autres.

f) RAYONS X. — La reconnaissance de la Montmorillonite par les rayons X est difficile car l'espacement basal des minéraux de son groupe varie avec leur état d'hydratation et la nature des bases échangeables. Ceci sera discuté au chapitre traitant de l'Utilisation des Rayons X. Une Montmorillonite Ca (dont la base échangeable est le Ca) montre un espacement basal typique de 15 Å dans les conditions normales d'humidité, suivi de raies assez faibles à 7 et à 5 Å. Chauffée à 200° il n'est plus que de 10 Å environ. Divers traitements sont connus qui permettent de déterminer parfaitement les montmorillonites en intensifiant ou modifiant leur spectre (Voir chapitre troisième).

g) ANALYSE THERMIQUE. — La courbe thermique des Montmorillonites (50) comprend en général 3 crochets endothermiques à 150, 600 et 750°.

h) MICROSCOPE ELECTRONIQUE. — Le microscope électronique (181-182) a montré que les montmorillonites et beidellites sont des cristaux très ténus en forme de plaques. Au contraire la nontronite et la saponite sont en forme de latte ou de sabre (ROSS et HENDRICKS 340). On remarquera l'habitus allongé que prennent les isotypes magnésiens des phyllites argileuses dans ce groupe comme dans celui de la kaolinite.

D) SÉRIE DE L'ATTAPULGITE.

a) STRUCTURE DE L'ATTAPULGITE. — Le nom d'attapulgitite a été donné à l'origine par J. DE LAPPARENT (207) au constituant argileux de terres à Toulon d'Attapulgis (Géorgie) et de Mormoiron (France). H. LONGCHAMBON (240) a démontré que ces attapulgitites appartenaient à la série des palygorskites-sépiolites de FERSMAN (107-108). Une structure a été proposée par BRADLEY (35) rendant compte à la fois du spectre de Rayons X et de l'habitus fibreux. Cette structure est rubanée. Entre des couches continues de tétraèdres de silice se trouvent en position alternée des couches octaédri-

ques à centre de Mg. Cette disposition en brique creuse laisse des lacunes dans le réseau où des molécules d'eau peuvent subsister.

Formule : $(\text{H}_2\text{O})_4(\text{OH})_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{20}$

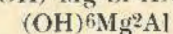
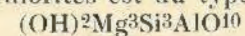
Le microscope électronique (181-167-103) a révélé que les particules de l'attapulgitite étaient fibreuses. Le spectre aux Rayons X de l'attapulgitite est tout à fait caractéristique, surtout quand on utilise la technique des plaquettes d'argile orientées. En effet, lors de la sédimentation, les fibres se sédimentent sans qu'une orientation privilégiée soit obtenue puisqu'elles ne sont pas aplaties. Le résultat est un spectre présentant des anneaux. Les lignes principales correspondent aux équidistances suivantes : 10,5 — 6,4 — 5,4 — 4,48 — 3,45 — 2,62, etc... Elles sont très caractéristiques. L'analyse thermique montre 4 crochets endothermiques à 150, 350, 500 et 800°.

b) ISOTYPE-SEPIOLITE. — Il semble bien que la sépiolite soit l'isotype magnésien de l'attapulgitite. Une structure en chaîne a été proposée par H. LONGCHAMBON (242). Le spectre de rayons X donne les lignes suivantes : 12,15 — 7,6 — 5,05 — 4,5 — 3,82, etc. Il est caractéristique comme le précédent par l'obtention d'anneaux même quand on réalise le spectre sur des plaquettes sédimentées. Ceci laisse supposer un habitus fibreux des cristaux de la sépiolite analogue à celui de l'attapulgitite. Ce faciès fibreux est d'ailleurs manifeste dans certains échantillons où la sépiolite est organisée en faisceaux comme ceux de l'amiantite; ceci est le cas de la sépiolite d'Ampandandrava qui fut le matériel de H. LONGCHAMBON (242). Grâce à M^{re} MATHIEU-SICAUD, le faciès fibreux de la sépiolite extraite d'une « terre » est démontré par une photographie au microscope électronique. Lui ayant confié un échantillon de ce minéral typique aux rayons X, elle a obtenu une magnifique photographie qui montre un aspect très voisin de celui des attapulgitites (181-167-103). Cette photographie est représentée planche IV.

E) LE GROUPE DES CHLORITES.

Les chlorites ont été trouvées sous forme de phyllites dans les produits d'altération des roches cristallines et dans les sols. Une sorte de chlorite vient d'être décrite par MAC EWAN et STEPHEN dans les marnes du Keuper anglais. Le groupe des chlorites est minéralogiquement connu par les travaux successifs de ORCEL (318), MAUGUIN (279), PAULING (321) et MAC MURCHY (255). La structure consiste en couches alternées de mica et de brucite, c'est-à-dire que la jonction entre les feuillets micacés n'est pas effectuée par les ions K comme dans le mica lui-même mais par des couches de brucite. Aux Rayons X les lignes principales qui caractérisent les phyllites chloritiques sont : 14 — 7 — 4,7 — 3,5 Å etc... Dans un mélange de minéraux la difficulté devient

extrême car les raies 14 Å coïncident avec celles de la Montmorillonite et des Vermiculites, la raie à 7 Å avec celle de la Kaolinite, la raie à 4,7 Å approximativement avec celle de la goethite et de l'hydrargillite, et la raie à 3,5 Å avec celle des micas. Ces coïncidences nécessitent pour permettre leur attribution à un minéral plutôt qu'à un autre, l'emploi de plusieurs méthodes qui se recoupent et qui seront exposées à propos des techniques aux Rayons X. La formule idéale des chlorites est du type suivant :



ce qui correspond à la formule plus condensée $(\text{OH})_8\text{AlMg}_5\text{Si}_3\text{AlO}_{10}$.

F) LES VERMICULITES ET LES HYDROBIOTITES.

GRUNER (156) en 1934, étudia la structure des Vermiculites et des Hydrobiotites. Il a proposé pour les premières une structure analogue à celle d'un mica mais sans alcali de compensation pour le déficit de valence dans les tétraèdres. De plus, des molécules d'eau faisaient partie de la structure $(\text{OH})_2(\text{Mg,Fe})_3(\text{Si,Al})_4\text{O}_{10} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.

Par contre, l'hydrobiotite était interprétée comme un mélange interstratifié de vermiculite vraie et de biotite vraie. Dans l'ensemble, il s'agissait de formes hydratées de micas octophyllites. L'espace basal est de 14 Å pour la vermiculite. Pour l'hydrobiotite on avait généralement coexistence de 12, 10 et 14 Å (GRUNER 156, RUTHRUFF 343). Récemment des notions nouvelles ont été apportées par BARSHAD (9) à partir des découvertes faites sur l'échange de base des vermiculites avec vérification par l'analyse thermique et les rayons X. Les vermiculites seraient des biotites dont le potassium serait remplacé par du Mg échangeable. La biotite (10 Å) ordinaire peut être transformée en vermiculite (14 Å) par lessivage prolongé avec une solution de MgCl_2 . La vermiculite (14 Å) se transforme en un minéral très semblable à la biotite (10 Å) par lessivage au KCl. L'hydrobiotite de GRUNER peut être considérée comme un mélange de biotite et vermiculite. Elle se transforme entièrement en vermiculite par lessivage au MgCl_2 et entièrement en biotite par lessivage au KCl.

BARSHAD confirmé par ailleurs l'existence de mélange vermiculite-chlorite tels que les avaient proposés HENDRICKS et JEFFERSON (173). Pour ces échantillons l'échange de base est inférieur à celui des vermiculites car des atomes Mg sont fixés dans la structure sous forme de feuillets de brucite. D'autre part les lignes à 7 et 4,7 Å s'ajoutent à celles à 14 et 3,5 de la vermiculite, pour donner les 4 lignes caractéristiques de la chlorite.

III. Les Roches Argileuses

Les roches sédimentaires sont classées habituellement en fonction du groupe de minéraux qui en forment la majeure partie. Exemple : les roches siliceuses, carbonatées, salines ou phosphatées. Dans cette conception, les roches argileuses seront celles où sera dominante une fraction formée d'un ou plusieurs minéraux argileux. Généralement cette fraction argileuse contenue dans la roche lui communiquera les propriétés que le sens commun attribue à l'Argile et en particulier la propriété de faire pâte avec l'eau. Ainsi, tout de suite après une définition quantitative, un critère qualitatif intervient. A la question de savoir si une roche peut être qualifiée d'argileuse si elle contient moins de 50 % de minéraux argileux mais si elle manifeste avec évidence les propriétés communes des argiles, la réponse est immédiate : cette roche est une roche argileuse. Là se pose un problème de limite aussi impossible à résoudre que tous les problèmes de ce genre. Dans le cas du mélange d'« argile » et de calcaire, par exemple, la question se pose de la manière suivante : à partir de quelle limite pouvons-nous parler d'un calcaire argileux plutôt que d'une argile calcaire ? Les limites que nous pouvons fixer sont arbitraires. Si la roche qui contient 50 % de calcaire semble faire une limite logique, décider de cette manière est en fait simpliste. En effet, le mot calcaire évoque aussitôt une roche dure et consolidée, or, il existe des marnes qui contiennent plus de 50 % de carbonates et qui ne sont pas consolidées. Inversement, il existe des roches qui contiennent plus de 50 % de matières argileuses et qui sont vigoureusement consolidées. Enfin comment peut-on classer en fonction de critères numériques une roche meuble qui contiendrait 45 % de carbonate, 45 % d'argile et 10 % de sable ? Elle ne serait pas à mettre dans les roches calcaires puisqu'elle ne contient pas une fraction majeure de carbonate de chaux ; elle ne serait pas non plus argileuse pour une raison symétrique. La conclusion est simple : à vouloir trop préciser on parvient à des absurdités ; une grande prudence est nécessaire. Une certaine docilité à l'usage est utile pour qu'un langage scientifique signifie quelque chose et soit possible à utiliser dans la pratique. Et l'on peut ajouter, pour le point de vue qui intéresse ce travail, que recherchant les relations entre la constitution et la genèse des roches argileuses, on a étudié ici des roches dans lesquelles l'argile n'était pas majeure ni même tellement manifeste. Pourtant elles étaient bien « argileuses » pour

une part et intéressantes pour autant. C'est en fonction de cette prudence que seront définies les roches argileuses dans ce travail.

ROCHES ARGILEUSES TYPIQUES.

Une roche argileuse typique sera formée en majeure partie d'un ou plusieurs minéraux argileux. C'est à ce type de matériau que le nom d'argile a été donné si communément. Mais comme ce terme est également utilisé pour désigner des sols, des boues, des minéraux et même des matériaux d'origine hydrothermale, il semble souhaitable de s'inspirer des efforts de la nomenclature actuelle et d'utiliser le terme d'argilite pour désigner les roches où l'argile est largement dominante, en l'absence de carbonates. Le terme de Serpentine a été défini d'une manière analogue vis-à-vis de celui de serpentine. Le mot argilite n'est pas encore usuel en France ; il deviendrait commode si on s'y ralliait. Le vocabulaire anglais est plus riche que le nôtre. Le mot « clay » désigne volontiers une argile encore plastique. Le mot « mudstone » correspond à une argile consolidée et je le traduirais volontiers par argilite. Le mot « shales » désigne des argilites à débit schisteux qui ne sont pas des schistes puisqu'elles font pâte avec l'eau, mais qui se présentent en tablettes ou plaquettes parallèles au sens de la stratification. Ce terme paraît extrêmement précieux. De là on passe au « slates » équivalent du schiste. On retiendra les termes d'argilite et de shales qui doivent permettre vis-à-vis du schiste de définir la majorité des roches sédimentaires argileuses.

ROCHES ARGILEUSES ET ROCHES CALCAIRES.

Les intermédiaires entre l'argilite et le calcaire existent tous. La séparation quantitative en plusieurs catégories est arbitraire. Il est aussi simple de s'inspirer du bon sens et de l'usage. Quand une argile est si faiblement calcaire que l'effervescence à l'acide est faible ou mal visible, on peut parler d'argilite calcaire. Dès que l'effervescence est nette, on parlera de marne. Le mot de marne désignera les argilites chargées en calcaires tant qu'elles n'ont pas la solidité des calcaires consolidés. Au contraire on parlera de calcaire argileux quand une roche bien consolidée ayant l'aspect du calcaire contiendra une phase argileuse appréciable : elle peut aller jusqu'à 20, 30 ou 40 %. Les locutions de marnes argileuses, argiles marneuses et calcaires marneux sont parfois reçues mais forment des pléonasmes. THIEBAUT (362) a montré qu'il est fréquent que la phase carbonatée des marnes soit dolomitique. On parlera alors de dolomie argileuse, et de calcaire argileux dolomitique. Avant l'analyse chimique, la nature du carbonate d'une marne est inap-

préciable si bien que le terme de marne garde son sens général pour désigner les roches meubles formées d'argile et de carbonate.

ROCHES ARGILEUSES ET ROCHES SILICEUSES.

Tous les intermédiaires existent entre l'Argilite d'une part et le Sable ou le Grès d'autre part : Argilite sableuse, Sable argileux, Grès argileux. Ici encore, il apparaît que le bon sens est le meilleur guide pour dénommer les roches livrées par les séries sédimentaires. On parvient ainsi aux roches où les phases argileuses, calcaires et siliceuses rivalisent et l'on peut définir les marnes sableuses, les grès marneux, etc...

TABLEAU N° 2
PRINCIPALES ROCHES ARGILEUSES

TYPES

	TEXTURE HOMOGÈNE	TEXTURE LITÉE	TEXTURE SCHISTEUSE
Roches typiquement ARGILEUSES	Argilite	Argilite litée "Shales"	Pélite Argile Schisteuse Schiste argileux
Roches ARGILEUSES CALCAIRES	Argilite calcaire Marne Marne Dolomitique Calcaire Argileux Dolomie Argileuse Marne Sableuse	Marne litée "Shales" Marneux	Marne Schisteuse
Roches ARGILEUSES SILICEUSES	Argilite Sableuse Grès Argileux	"Shales" Sableux	

QUELQUES VARIÉTÉS

Variétés Minéralogiques	Argile salifère Marne saline Marne à gypse Marne limoneuse	Argile latéritique Latérite argileuse Grès glauconieux Marne glauconieuse	Gaize argileuse Argile ferrugineuse Marne micacée Pélite micacée
Variétés dues au faciès	Argile bigarrée Argile vergicolore Marne rubanée Argile à varves	Marne en plaquettes Schiste carton Argile plastique	Marne opolithique Marne à nodules Marne à septarias Argile à silax
Variétés Organiques	Marne à Foraminifères	Marne à Spongiaires	
Variétés selon l'utilisation	Argile réfractaire	Marne téguline Calcaire argileux à ciment	Bentonite Terre à foulon Terre à dégraisser Argile smectique Argile décolorante

ROCHES ARGILEUSES ET ROCHES DIVERSES.

On peut rencontrer une phase argileuse notable dans bien des types de roches sédimentaires étrangères aux trois grandes catégories susdites : Argilites salines, Marne saline, Marne à gypse, Argile latéritique, Latérite argileuse, Gaize argileuse, Marne bitumeuse, etc...

VOCABULAIRE.

C'est ainsi que se révèle la souplesse de la nomenclature française en matière de roches sédimentaires. Si L. CAYEUX a simplifié la variété des termes créés par chacun au cours des temps, il nous reste un langage facile à utiliser à condition de prendre garde sans cesse au sens étymologique des mots que l'on emploie.

Le tableau n° 2 résume les termes que nous utiliserons.

IV. Historique des recherches sur la constitution et la Genèse des roches argileuses sédimentaires.

Il paraît indispensable de faire une revue historique simple des progrès réalisés dans la compréhension de la pétrogénèse des Roches argileuses. Cette histoire est intimement liée à celle des recherches faites par d'autres savants s'intéressant aux « argiles », comme les pédologues étudiant la genèse des argiles des sols, les métallogénistes étudiant les kaolinisations et séricitisations hydrothermales et les chimistes minéralogistes recherchant les synthèses de minéraux argileux au laboratoire. Certains points des travaux de ces divers spécialistes seront examinés dans la troisième partie de ce travail où ils viendront étayer la thèse qui y sera soutenue. La limite entre ces travaux et ceux qui sont du domaine de la pétrographie sédimentaire est forcément artificielle, mais on a cherché ici à voir clairement les courants principaux d'une évolution.

D'une bibliographie aussi complète que possible sur les argiles, j'ai cherché à montrer les principales étapes qui ont été parcourues vers la compréhension causale de la genèse des roches sédimentaires argileuses. En d'autres termes cet historique est limité aux travaux faits d'un point de vue strictement géologique sur les sédiments.

A) DE 1894 A 1914.

En 1894, LE CHATELIER (226) avait analysé les résidus insolubles extraits des calcaires à ciment et chaux hydrauliques. Ses analyses lui montrèrent que trois des résidus étudiés pouvaient être rapprochés de certains silicates d'alumine alors mal définis, nommés montmorillonite, confolensite, steargilite, cimolite. Par contre, le quatrième se rapprochait de la bravaisite potassique de MALLARD. VOGT (384) étudiant la composition des argiles reconnaît la kaolinite dans les argiles utilisées comme réfractaires, mais trouve dans les marnes une fraction argileuse d'une toute autre nature. Elle semble formée par des débris de minéraux magnésiens (biotite, chlorite, et autres). LAVEZARD (222) étudiant des argiles d'ailleurs calcaires de Brunoy et de Montmirail y découvre une phase argi-

leuse où le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ est supérieur à 2 et où entre de la magnésie, de la chaux et de la potasse.

WULFING (394) en 1900, étudiant déjà les marnes du Keuper conclut que la kaolinite n'entre dans les sédiments en question que pour une très faible part. Ceux-ci seraient pour lui principalement constitués d'une chlorite alcaline et de pilolite, l'un des membres de la série des palygosrkites de FERSMANN (107-108). On retrouve ici les silicates potassiques et magnésiens.

En 1914, LE CHATELIER, rédigeant son traité sur la silice et les silicates, dit qu'on parle souvent « mais à tort » de calcaires argileux ou d'argiles calcaires pour désigner les marnes telles que celles de l'Oxfordien. « En réalité, les matières siliceuses des marnes que l'on peut facilement isoler par l'action d'un acide faible, comme l'acide acétique, n'ont aucun rapport de composition avec la kaolinite » (230). Cette affirmation aujourd'hui surprenante, s'explique et se révèle exacte, quand on sait que pour les savants de cette époque n'est « argile » que ce qui est kaolinique. Cette période antérieure à 1914 a donc montré d'une manière nette que la kaolinite n'est pas le constituant caractéristique commun de toutes les roches qui montrent des propriétés argileuses. Il était normal qu'on l'ait cru auparavant : 1° parce que la kaolinite était un minéral bien connu, bien défini et fréquent. 2° parce que les roches sédimentaires dont il était l'élément cardinal étaient celles qui sur le marché avaient seules de la valeur, comme terres réfractaires ou céramiques. En fait, dès 1914, il était assuré que toutes les roches sédimentaires ne sont pas composées dans leur phase argileuse par la kaolinite. Ce sont surtout les marnes qui ont attiré l'attention, mais VOGT (384) remarque que les terres « dites de Rambervillers », contiennent une phase silicatée analogue à celle des marnes. Il se demande s'il y a, dans ce fait, une coïncidence. Il fait appel à la muscovite puis attribue la présence du magnésium à des minéraux magnésiens (biotite, chlorite et même « diallage hydraté »).

D'une manière générale d'ailleurs les alcalis qui sont toujours présents dans les roches argileuses même kaoliniques sont attribués à la présence de mica muscovite et il faudra attendre l'application par Léon BERTRAND et A. LANQUINE (1923), des techniques microscopiques aux réfractaires pour faire cesser cette tradition (21-22-198).

B) 1914-1935.

En 1923, J. DE LAPPARENT (205) dans son Traité de Pétrographie, prend la question au point où nous l'avons laissée. Il écrit que s'il y a lieu de songer que la phase argileuse des marnes est partiellement faite de kaolinite ou d'hallowite, il y a lieu de croire aussi qu'elle est constituée, et souvent en majeure partie, de séricite ou de chlorite. A la même époque, THIEBAUT (361) donne

ses premiers résultats et montre que les marnes du Keuper renferment un silicate alcalin qui se rapproche de la glauconie et qu'il assimile à la Bravaisite de MALLARD.

En 1925, le travail de THIEBAUT (362) paraît. Les conclusions qui nous intéressent ici sont les suivantes:

1° Les sédiments marins contiennent un aluminosilicate de fer, de magnésie et de potasse voisin de la bravaisite.

2° La plupart de ces sédiments ne contiennent pas d'argile (nous dirions aujourd'hui de kaolinite).

3° Les argiles réfractaires ne sont pas des dépôts marins.

4° La bravaisite comme la glauconie s'est formée par l'action de l'eau de mer sur les dépôts terrigènes.

A ma connaissance c'est ici, pour la première fois, qu'un pas important est franchi, celui qui consiste à relier la composition d'une roche argileuse à son origine et à ses conditions de dépôt. Et l'on voit se dessiner une sorte de dyptique où la sédimentation marine d'une part donnerait des minéraux bravaisitiques, tandis que les argiles réfractaires kaoliniques se trouveraient dans des dépôts d'eau douce.

En 1934, dans une publication de 2 pages, DREYFUSS (97), tenant compte des acquisitions de LE CHATELIER et de THIEBAUT et d'une mise au point faite par ROSS et KERR (337) des connaissances reçues en 1931 sur les argiles, oppose à nouveau deux catégories de roches sédimentaires; les unes sont formées dans l'eau douce où les milieux d'altération à réaction acide et les autres sont formées dans l'eau de mer à réaction basique. Les premières seraient

SiO_2

composées essentiellement d'une « argile », dont le rapport

$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$

serait inférieur à 3, appartenant au groupe de la kaolinite. Les secondes contiendraient plus de silice, le rapport

$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$

pouvant

$\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{\text{SiO}_2}$

monter jusqu'à 9. DREYFUSS propose alors une notion capable de rendre service comme hypothèse de travail, celle de cycle des minéraux argileux. D'abord formés en milieu acide, les minéraux argileux seraient kaoliniques dans les milieux d'altération et dans les lacs d'eau douce. Repris par l'érosion, ils gagneraient la mer où ils se transformeraient en s'enrichissant en silice et en se chargeant de bases diverses.

Au cours de cette période « d'entre deux guerres » il a été acquis qu'un lien peut exister entre la nature de la phase argileuse d'une roche et son milieu de genèse. D'autre part le géologue s'aperçoit que

la réaction du milieu semble intervenir dans cette genèse de la même manière que les pédologues s'en sont aperçu (MATTSON 269-271) pour la genèse des sols. Il faut noter que les acquisitions de la science sur la genèse des sédiments au cours de cette deuxième période n'ont à peu près aucun retentissement sur les connaissances communément admises ou enseignées à cette époque.

C) 1935-1946.

Au cours de cette période récente, la minéralogie permet de connaître de mieux en mieux les minéraux argileux grâce à l'entrée en jeu de méthodes modernes, au premier rang desquelles se trouvent les rayons X. Les constituants des roches purent être inventoriés avec une précision de plus en plus grande et les conditions de genèse purent être à nouveau discutées sur la base de bonnes déterminations pétrographiques.

En ce qui concerne la détermination pétrographique, il se confirma que les roches argileuses réfractaires utilisées en céramique avaient pour constituant majeur la kaolinite. D'autre part, un grand nombre de terres à foulon ou terres décolorantes ou argiles smectiques, se révélèrent constituées surtout par la montmorillonite. Les roches les plus typiques de cette catégorie sont les bentonites. Enfin, entre 1935 et 1937 les écoles allemande, américaine et française parvinrent à peu près parallèlement à caractériser minéralogiquement un constituant fréquent des roches sédimentaires bâti sur le type mica. Sous le nom de « séricite like mineral » (126), « glimmerton » (102), bravaisite (211), illite (129) et même attapulgite au sens large que lui donnait à l'époque J. DE LAPPARENT (213) ce nouveau minéral se révéla dans une foule de roches argileuses sédimentaires.

En ce qui concerne la reconstitution de l'origine de ces différentes roches, les généralisations sont rares. Le temps des chercheurs est occupé à l'inventaire et il leur est difficile avec peu de documents de généraliser.

Cependant, très vite, la plupart des bentonites ou roches à montmorillonites, si précieuses à l'industrie pour maints usages, est reconnue comme résultant de l'altération en milieu hydromagnésien de laves vitreuses (388-177-208-210-217-375-365).

D'autre part, Jacques DE LAPPARENT, après qu'il eut défini une vaste famille de phyllites micacées à 10 Å à laquelle il donnait le nom de famille des attapulgites (213), montra à plus d'une reprise que ces minéraux ne pouvaient se former que dans des milieux salins (211-212). Cette famille qui nous paraît aujourd'hui hétérogène au point de vue minéralogique, renfermait pour

l'auteur, les bravaisites, les attapulgites s.s., les sépiolites, et enfin les glauconies. Les gîtes où ces minéraux se révélaient abondants apparaissaient chargés de sels figurés, de chaux, de magnésie ou à tout le moins bien caractérisés comme ayant été formés en milieu salé. Au II^e Congrès Mondial du Pétrole, en 1937, J. DE LAPPARENT résume ainsi sa pensée en une synthèse saisissante. Les dépôts kaoliniques seraient accumulés dans des bassins de sédimentation voisinant des régions où les climats tropicaux et des végétations puissantes favorisent la formation de la kaolinite. Par contre, les dépôts nettement caractérisés par un minéral argileux micacé seraient salés ou lagunaires, en tout cas chargés comme le sont les bassins fermés désertiques en sels calciques ou magnésiens (212). Enfin, la montmorillonite nécessiterait en milieu hydromagnésien un matériel originel volcanique.

En 1938, le mica est décrit dans les sédiments marins actuels à la suite des campagnes récentes du Météor (69). En 1941 DIETZ (94) montre la fréquence de l'illite dans les sédiments marins actuels et GRIMM (140) en 1947 résume les acquisitions de quinze ans de travail en écrivant que l'illite est le minéral dominant d'un grand nombre de sédiments marins actuels, et le constituant de beaucoup, peut-être de la plupart, des shales marins, fossiles.

En 1942, P. URBAIN utilisant le raisonnement thermodynamique (376) montre que les sédiments argileux peuvent être « authigènes » c'est-à-dire, s'être développés de toutes pièces dans le milieu de sédimentation, la règle des phases permettant au système d'opter vers une néoformation plutôt que vers une autre. L'observation des roches montre, en effet, que les sédiments nés en milieu carbonaté optent volontiers pour une néoformation argileuse magnésienne ou calcomagnésienne.

En 1945, ROSS (341) souligne d'un point de vue géologique, le rôle prépondérant qu'auraient les bases dans la genèse des minéraux. Dans les milieux acides ou de fort lessivage les bases sont entraînées et la kaolinite peut naître. Dans un milieu où les bases convenables sont présentes, c'est la montmorillonite qui apparaît. Tous les minéraux argileux parvenus dans la mer se chargeraient en potassium, ce qui expliquerait la fréquence de l'illite dans les sédiments marins. Ici, on le voit, la considération du climat et la réaction du milieu cèdent le pas, comme cause première, à la composition chimique du milieu.

Enfin, en 1946, un essai de classification des argiles d'un point de vue génétique est fait par RIVIERE (330) de la manière suivante : l'altération des roches grenues acides sous l'influence des eaux acides donne des argiles essentiellement kaoliniques. Celles-ci

se rencontrent aussi en gîtes sédimentaires secondaires où les conditions physicochimiques seraient voisines et caractérisées par l'acidité du milieu. L'altération des roches vitreuses donnerait des roches à montmorillonite. « L'altération banale de la plupart des roches dans les conditions ordinaires de pH » mènerait aux illites et bravaisites. Enfin les faciès lagunaires seraient caractérisés par les roches contenant palygorskites et sépiolites.

CONCLUSIONS.

Au cours de cet historique, se sont dégagées des hypothèses intéressantes qui orientent le travail actuel. Ces hypothèses font appel tantôt à la qualification du milieu (marin, lacustre ou lagunaire), tantôt à sa composition (calcique, magnésien), tantôt à son pH (acide, basique), tantôt à des considérations climatiques (forestier, tropical, désertique). Tout ceci n'est pas forcément contradictoire et peut effectivement ne pas se contredire. Mais si succincte que soit cette revue les contradictions ne manquent pas. Le même minéral se trouve caractériser pour deux auteurs deux milieux différents. Telle ou telle revue des conditions de genèse des minéraux argileux néglige ici le milieu marin, là le milieu lagunaire sursalé, qui sont pourtant très importants. C'est pourquoi, ainsi qu'il est visible, la question n'est pas pleinement résolue à l'heure actuelle et autorise qu'on y travaille. C'est pourquoi aussi, l'inventaire systématique des roches argileuses doit être sans cesse continué en accumulant à la fois les renseignements géologiques sur le milieu de genèse et les renseignements pétrographiques sur les constituants. J'ai poursuivi cet inventaire dans le même laboratoire que L. THIEBAUT et vingt ans après lui.

CHAPITRE SECOND

MÉTHODES D'ÉTUDES DES ROCHES ARGILEUSES

Réservant au chapitre suivant les méthodes spéciales qu'on utilise pour l'étude de la phase argileuse elle-même, on trouvera dans ce chapitre second l'exposé des méthodes utilisées pour l'étude de la roche dans son ensemble et des constituants non argileux. Ces méthodes seront exposées au cours des paragraphes suivants :

- I — Etude au microscope.
 - II — Le problème du dosage des divers constituants d'une roche argileuse.
 - III — Elimination des matières organiques.
 - IV — Dosage des sels solubles dans l'eau.
 - V — Dosage des hydroxydes.
 - VI — Dosage des carbonates.
 - VII — Dosage des insolubles.
 - VIII — Etude des minéraux en grains et des organismes.
 - IX — Mesure du pH caractéristique d'une roche argileuse.
 - X — Formule et représentation graphique d'une roche argileuse.
-

I. Etude au microscope des roches argileuses

Le microscope polarisant peut être utilisé de deux manières en ce qui concerne les « Argiles ». Instrument du minéralogiste, il sert à étudier le minéral argileux lui-même, soit dans la roche, soit après son isolement : ce point de vue sera envisagé plus loin. Instrument du pétrographe, il permet d'étudier la roche elle-même : ce point de vue sera étudié ici.

La taille des lames minces nécessite des techniques spéciales (CAYEUX 61, L. BERTRAND 22, DREYFUSS 95, MEYER 282). Le principe consiste à faire cuire la roche dans un produit (baume, colle au silicate, vernis, lucite, etc.), qui lui donne une cohésion qui lui permette de supporter le polissage. Une fois la plaque mince obtenue, elle donne de précieux renseignements. Les observations qui peuvent être faites portent sur les points suivants :

A) TEXTURE DE LA ROCHE.

Les variations de la texture sont infinies, il n'existe pas de code pour les qualifier et il serait regrettable de figer un langage qui a gardé toute sa souplesse. Cependant les variétés des termes utilisés ne désignent pas toujours le même genre de faits suivant les auteurs et ceci vient de ce que la texture peut être étudiée de deux manières. C'est pourquoi je propose de distinguer :

- la texture normale à la stratification
- et la texture parallèle à la stratification.

J'ai longuement hésité avant de choisir entre les termes de stratification et celui de litage après la précision de BOURCART (32) au sujet de ces deux termes. La stratification est l'action de placer les unes sur les autres des couches successives de diverses substances. Le litage est le fait pour une roche sédimentaire ou non d'être litée. Or ici, ce que je cherche avant tout au microscope, c'est à observer perpendiculairement au plan d'empilement des couches stratifiées pour en apprécier la succession. C'est donc bien perpendiculairement à la stratification que je veux me placer, d'autant que bien des roches sédimentaires ne sont pas litées. Pratiquement, quand il existe, le plan de litage est fréquemment superposé au plan de stratification. Il est évident que c'est alors sur le plan de litage qu'on se fie pour apprécier le plan de stratification. L'utilisation de ces distinctions est précieuse.

1° La texture normale à la stratification correspond à ce qui est visible dans une plaque mince taillée perpendiculairement à la stratification quand on peut apprécier celle-ci dans le gîte ou même sur l'échantillon. Cette texture pourra se qualifier par un grand nombre de termes à la convenance de l'observateur. La texture sera :

- homogène* si rien ne se révèle comme particularité;
- orientée* si on voit que les phyllites ont un allongement préférentiel en raison de la sédimentation, de la diagénèse ou de toute autre cause;
- litée* si la roche apparaît formée de lits successifs sans alternances de phases diverses;
- cyclique* s'il y a alternance de phases différentes correspondant à des microcycles de sédimentation (argiles à varves — marnes rubanées), Planche I, Figure 1;
- microlenticulaire* si ces cycles sont tellement locaux qu'ils paraissent discordants à l'échelle de l'échantillon ou de la plaque mince (URBAIN 373).

2° La texture parallèle à la stratification se définit d'elle-même. Il est évident que si le plan de sédimentation ne se manifeste par rien, la distinction tombe et tout le vocabulaire ici utilisé s'applique dans n'importe quel plan de section. D'un autre point de vue, deux cas peuvent se présenter ici.

Ou bien la phase argileuse est masquée par un autre constituant, en particulier par les carbonates, et l'observation revient à celle d'une roche sédimentaire ordinaire (v. plus loin). Ou bien la phase argileuse, majeure, est visible. Il arrive souvent, d'ailleurs, que si la phase argileuse est masquée dans l'ensemble de la plaque mince, elle apparaisse dans les biseaux de celle-ci. Dans ce cas, on peut utiliser les termes suivants parmi lesquels se trouvent ceux qui résultent des travaux de L. BERTRAND et A. LANQUINE (21, 22), P. URBAIN (373) et MUNIER et RIVIERE (296). On peut dire que la texture sera :

- cristalline* quand des paillettes cristallines bien individualisées forment le fond;
- cryptocristalline* quand cette cristallinité est encore appréciable mais d'une manière confuse avec une limite floue au bord des petites plages biréfringentes. On peut souligner avec le gypse teinte sensible, les oppositions de la biréfringence;
- cachée, invisible ou amorphe* quand le fond argileux paraît isotrope. Les textures cryptocristallines ou cachées peuvent comporter des *alignements* ou des *trainées biréfringentes* (Planche I, Figure 2). La locution de texture fibreuse doit être évitée car elle prête à confusion étant donné que dans la majorité des cas les minéraux qui forment

ces trainées sont lamellaires et non fibreux. Cet aspect autrefois qualifié de halloysitique (22) est très fréquent. Il n'est pas caractéristique des argiles halloysitiques; *maillée* quand des cristallites sont enchevêtrés à la manière du faciès microscopique de l'antigorite; *floconneuse*, cette texture est fréquente. Je donne ce nom aux textures où la phase argileuse est organisée en petites sphères. Celles-ci apparaissent en plaque mince avec l'aspect de cercles moins biréfringents entourés soit de phyllites plus biréfringentes, soit de petits cristaux de calcite, soit d'impuretés diverses. Deux bons exemples en sont fournis par les échantillons de Héming n° 2 et Gergovie n° 61. L'un d'eux est représenté sur la planche I, figure 3; *fissurée, réticulée ou boudinée* (URBAIN 373) selon l'ordonnance des minéraux au voisinage des fissures.

B) RELATIONS APPROCHÉES DE POSITION ET DE QUANTITÉ ENTRE LES TROIS ÉLÉMENTS CARDINAUX DE LA ROCHE.

Éléments argileux, carbonatés et sableux. C'est ce que nous appellerons *l'aspect général du microfaciès*.

C) OBSERVATIONS SUR LA PHASE CARBONATÉE.

Forme. Taille des cristaux. Concrétionnements. Filonnets. Répartition vis-à-vis du fond argileux (Planche I, Figure 4).

D) OBSERVATIONS SUR LA PHASE SABLEUSE OU DÉTRITIQUE.

- I — Forme des grains.
- II — Diamètre moyen des grains.
- III — Tailles extrêmes.
- IV — Répartition homogène, locale, stratifiée ou hétérogène.
- V — Evaluation approximative de la quantité de détritiques.

E) OBSERVATIONS SUR LES MINÉRAUX ACCESSOIRES OU ACCIDENTELS.

Sel gemme. Gypse. Glauconie. Micas. Pyrite. Limonite. Matières bitumineuses, etc... (Planche II, Figures 1 et 2).

F) APERÇU SUR LA MICROFAUNE ET LA MICROFLORE.

Présence d'organismes. Appréciation de leur appartenance zoologique. Disposition dans la roche. Etat de ces témoins : roulés, brisés, intacts. Épaisseur du têt (Planche II, Figure 3).

L'ensemble de ces observations correspond aux acquisitions dues à DREYFUS (99), CAYEUX (61-63), P. URBAIN (374). Elles correspondent à toutes les traditions de la pétrographie sédimentaire et permettent une connaissance déjà approfondie de la roche, qui est très importante à un double point de vue.

a) D'abord ces observations microscopiques permettront de faire le plan de l'étude analytique qui sera orientée grâce à elles.

Exemples : La présence du gypse révélé à l'examen microscopique entraînera un lavage à l'eau plus prolongé pour être sûr de l'éliminer. La présence d'hydroxyde de fer prévient d'avoir à le rechercher avec soin. La présence de grains de glauconie dans la

TABLEAU N° 3

PLAN DE L'ÉTUDE MICROSCOPIQUE
des
ROCHES ARGILEUSES

Aspect général du MICROFACIÈS	Allure générale de la plaque mince. Proportion des 3 constituants cardinaux. Carbonates. Argile. Détritiques. Présence et allure des minéraux accessoires et des organismes..			
Texture perpendiculaire à la Stratification	Homogène Orientée Litée Schisteuse	Cyclique Microlenticulaire		
Texture parallèle à la Stratification	Phase argileuse masquée - Voir paragraphes 4-5-6-7. Phase argileuse visible	Cristalline Cryptocristalline Amorphe	en trainées maillée floconneuse	fissurée réticulée boudinée
Phase carbonatée	Forme des cristaux Taille des cristaux Proportion	Concrétions Filonnets Accidents		
Quartz	Forme des grains Taille des grains Diamètre moyen	Répartition Proportion		
Minéraux accessoires accidentels	Sel Gypse	Magnétite Pyrite	Glauconie Mica	Limonite Matières bitumineuses etc...

Microfaune
Microflore

phase argileuse nécessite leur extraction avant la dispersion, pour ne pas fausser l'analyse chimique de la phase argileuse, etc...

b) Cette étude microscopique est ensuite très intéressante car non seulement elle permet de prendre une première connaissance de la roche, mais elle « met en place » tous les résultats de l'étude analytique. Après l'analyse qui a dépouillé la roche en ses constituants, l'examen microscopique restitue la « physionomie » naturelle de l'échantillon. C'est ainsi qu'a été défini le microfaciès de la roche, qui est l'équivalent du faciès à l'échelle de l'affleurement ou de l'échantillon. Et les éléments de ce microfaciès peuvent donner sur cette roche des présomptions importantes quand aux conditions de genèse.

Le tableau n° 3 résume les diverses observations utiles à faire au microscope.

II. Le problème du dosage des divers constituants d'une Roche Argileuse.

A) LES DONNÉES DU PROBLÈME.

Les roches argileuses peuvent contenir un grand nombre de constituants fort différents. D'une manière générale et en dehors de constituants exceptionnels, pour lesquels un traitement spécial est à prévoir, une roche argileuse peut contenir les constituants suivants :

Sels solubles dans l'eau (sel-gypse-anhydrite), carbonates (calcite-dolomite), hydroxydes de fer et d'alumine, phase argileuse, insolubles (formés surtout par le quartz).

Le problème consiste à évaluer ces différents constituants d'une manière quantitative. Il n'y a d'ailleurs pas lieu de rechercher une précision très grande qui serait illusoire puisque ces proportions varient d'un échantillon à l'autre dans un même gisement. Par contre, il est important de ne doser sous une rubrique que ce qui lui appartient et ceci pose tout le problème de l'analyse chimique rationnelle. Cette question a été discutée ailleurs (P. URBAIN 374).

B) LA MÉTHODE UTILISÉE.

La méthode utilisée dans ce travail consiste à faire à chaque fois que c'est possible des mesures sur des prises directes, ceci afin de simplifier les manipulations dans un but de rapidité et afin de ne pas additionner les erreurs dans un but de précision. Les agents d'attaque ont été choisis en fonction des travaux de recherche sur l'analyse rationnelle (THIEBAUT 362) (JACQUEMIN 186) et en fonction d'essais complémentaires décrits plus loin. Cette méthode peut se résumer de la manière suivants :

- 1° Dosage des sels solubles après ébullition dans l'eau.
- 2° Dosage des carbonates et des hydroxydes par attaque à l'acide chlorhydrique décinormal.
- 3° Dosage des insolubles au premier rang desquels vient le quartz détritique, par une attaque à l'acide sulfurique.
- 4° Dosage de la phase argileuse par différence en sachant que certains minéraux contenus dans la roche sont dosés avec la phase argileuse de cette manière. Cependant, s'ils sont importants ils sont

évalués approximativement par ailleurs, dans les produits du « lavage » de la roche qui livre les minéraux en grains.

C) DISCUSSION.

L'isolement des sels solubles ne pose pas de difficulté non plus que l'attaque brutale à l'acide sulfurique. A la suite de cette attaque sulfurique seul le quartz, qui constitue l'essentiel de la phase insoluble subsiste accompagné d'un peu de Feldspath et de Zircon. Par contre, un problème délicat est celui du dosage des carbonates et des hydroxydes. JACQUEMIN (186) dans son analyse rationnelle dose séparément les carbonates et les hydroxydes, les premiers par l'acide acétique à 50 % et les seconds par l'acide chlorhydrique à 10 %. Cette méthode appliquée aux roches n'a pas donné de résultats satisfaisants, car les roches sont souvent dolomitiques. Or, la dolomite s'attaque plus difficilement que la calcite. L'expérience a montré que quand la dolomite était enfin dissoute, les hydroxydes l'étaient au moins en partie. C'est pourquoi carbonates et hydroxydes ont été mis en solution ensemble, et dosés ensuite.

Un problème beaucoup plus délicat est celui de l'influence de l'attaque à l'acide chlorhydrique décinormal sur la phase silicatée. Il est à craindre que cette attaque ne laisse pas les minéraux argileux intacts. Pratiquement les constituants qui peuvent passer en solution par cette attaque sont les suivants :

1. Carbonates;
2. Hydroxydes;
3. Bases adsorbées sur les minéraux argileux, et bases échangeables;
4. Cations appartenant au réseau argileux lui-même.

Il faut rechercher une méthode qui mette en solution 1 et 2, qu'on recherche, et 3 qu'il est impossible d'éviter, mais qui respecte 4 au maximum. J'ai considéré que l'attaque à l'acide chlorhydrique décinormal était une méthode acceptable à la suite des essais préliminaires suivants :

D) ESSAIS PRÉLIMINAIRES.

On doit tenir compte des essais de GOLLAN et CODONI (124). Ceux-ci font agir l'acide chlorhydrique à 1 % pendant 5 minutes sur la phase inférieure ou égale à 2 μ . Au premier lavage 40 à 50 % du Ca adsorbé sur l'argile est enlevé et la presque totalité du Mg. Au troisième lavage tous les cations adsorbés sont enlevés et l'attaque des minéraux semble commencer mais faiblement. Pour contrôler la quantité de matière argileuse mise en solution, les poids

de silice et de sesquioxydes enlevés à la terre ont été dosés. La somme des poids de ces oxydes reste inférieure à 2 %. Cette attaque est donc tout à fait faible.

Par un autre moyen j'ai cherché à apprécier l'intensité de l'attaque à l'acide décinormal sur des roches. Il s'agit d'attaques faites sur des fractions identiques par des acides de concentration croissante. Les roches choisies sont les suivantes :

1° Grès glauconieux de Moeslains (Haute-Marne). Roche non calcaire dont le minéral caractéristique est la glauconie.

2° Argilite de Louvemont (Haute-Marne). Argile non calcaire contenant dans sa phase argileuse environ 50 % d'illite et 50 % de Kaolinite.

3° Marne de Moeslains (Haute-Marne). Marne pauvre en calcite dont la phase argileuse contient 40 % de Kaolinite contre 60 % d'illite.

L'intensité de l'attaque a été suivie par le dosage colorimétrique du magnésium. Les résultats numériques sont les suivants exprimés en nombre de milligrammes de Mg dissoute pour 100 mg de roche :

	N/40	N/20	N/10	N/4	N/2	N
Grès glauconieux	1,2	1,6	1,6	1,6	1,92	1,92
Louvemont	0,32	0,32	0,32	0,32	0,48	0,48
Marne Moeslains	0,88	1,48	1,48	1,48	1,54	2,20

Ces résultats montrent qu'il existe un palier dans l'intensité des attaques en fonction de la concentration de l'acide aux environs de N/10. Les résultats ont été suivis aux Rayons X, pour la Marne de Moeslains, les carbonates n'apparaissent plus à partir de l'attaque N/10 très prolongée. Par contre, ils sont encore visibles pour N/40. Ceci tend à montrer que seuls les carbonates et les ions adsorbés sont enlevés par les acides en-dessous de la concentration N/4. L'attaque du minéral argileux commence ensuite. Dans la difficulté où l'on se trouve pour apprécier les seuils qui existent dans les vitesses de réaction qui régissent toutes ces attaques, ces résultats ont paru satisfaisants.

CONCLUSION.

L'attaque à l'acide chlorhydrique décinormal a été utilisée en considérant qu'à cette concentration l'acide dissout les hydroxydes et les carbonates et respecte les cations silicatés d'une manière tout à fait admissible.

III - Destruction des matières organiques

Des matières humiques peuvent parfois se trouver dans une roche sédimentaire quand celle-ci a été prélevée à quelques mètres sous la surface du sol. Il est nécessaire de les détruire pour faciliter une bonne dispersion future de la phase argileuse. Cette destruction est obtenue par apports répétés d'H₂O₂ à 6% en volume, au bain-marie. On peut aussi utiliser l'eau de brome mais son action est plus difficile à ménager. Des études spéciales nécessitent parfois de doser les matières humiques. Une méthode à la soude a été décrite précisément par MUNIER et RIVIERE (296).

IV - Dosage des sels solubles dans l'eau

Les roches argileuses contiennent souvent des sels solubles dans l'eau et souvent en petites quantités, quelle que soit l'origine de la roche (VATAN 379). Les seuls qui soient importants sont les chlorures et les sulfates. Le procédé le plus simple a déjà été utilisé par THIEBAUT (362). Il consiste en lavage de la roche délitée (ou broyée) à l'eau bouillante. La teneur en chlorures et en sulfates est déterminée dans la solution après filtration. Ainsi se trouve évaluée avec une précision très satisfaisante la phase saline des roches sédimentaires, qui varie d'ailleurs d'une prise à l'autre dans un même niveau. On doit tenir compte de la solubilité de ces sels dans l'eau de façon à utiliser assez d'eau pour évacuer toute la fraction soluble. Un litre d'eau dissout 1,75 g de gypse par litre à 0°; 2,10 g à 35° et 9,69 à 100°. Un litre d'eau dissout 5,87 d'anhydrite naturelle dite insoluble à 120° (on a compté 4 g à 100°).

Une partie des sels solubles peut être retenue par la matière argileuse sans qu'un lessivage à l'eau bouillante même répété puisse les arracher aux matières colloïdales qui les retiennent. On doit alors envisager une calcination ménagée. Cette méthode utile dans des recherches spéciales est exposée par MUNIER et RIVIERE (296).

V - Dosage des hydroxydes libres

Les hydroxydes libres sont difficiles à éliminer. Les principaux sont les sesquioxides de fer et d'aluminium. Quand la roche n'est pas calcaire, un certain nombre de méthodes sont utilisées. Les principales sont : celle de TRUOG (366) qui fait agir l'hydrogène sulfuré; celle de TAMM (355) qui utilise l'oxalate d'ammonium acidulé à pH 3,2; celle de GALBUTSKAJA et GOVOROVA (116 bis) qui utilisent l'hydrosulfite de sodium.

Quand la roche est calcaire on a songé à des attaques successives telle que celle qui a déjà été décrite par JACQUEMIN (186). On s'est décidé en raison de la présence de la dolomite à mener de front l'attaque des sesquioxides et celle des carbonates par l'acide chlorhydrique décinormal. Quand la liqueur est obtenue, elle est amenée à pH 7,5 par l'ammoniaque très diluée, les sesquioxides précipitent tandis que CaO et MgO restent en solution. Le dosage suit immédiatement.

VI - Dosage des carbonates

Une grande partie des roches argileuses est carbonatée. Les minéraux les plus fréquents sont la calcite et la dolomite. L'étude quantitative de la phase carbonatée se divise en deux :

- 1° Dosage du gaz carbonique;
- 2° Dosage de la chaux et de la magnésie.

1° DOSAGE DU GAZ CARBONIQUE.

Méthode pondérale. — Utilisation de l'appareil de GEISSLER. La manipulation est décrite dans le traité de CAYEUX (61), page 21. La roche pulvérisée finement et l'acide chlorhydrique sont disposés dans deux parties indépendantes de l'appareil. La tare est faite. On fait tomber progressivement l'acide sur la poudre et le CO₂ se dégage. La vapeur d'eau est retenue par un desséchant. La perte de poids mesure la quantité de gaz carbonique perdu.

Méthode volumétrique. — Le principe est le même mais le gaz carbonique se dégage dans un manomètre. On mesure le volume de gaz dégagé et après les corrections de température et de pression nécessaires, on obtient le poids de gaz carbonique.

Méthode approximative. — Avant d'utiliser la méthode volumé-

trique, il est bon d'avoir un ordre de grandeur de la quantité de CO_2 dégagée, de façon à travailler sur une prise qui donne un dégagement compatible avec le volume intérieur du manomètre. On peut opérer de la façon suivante : sur quelques grammes de roche finement pulvérisée on fait agir une solution de ClH normal jusqu'à ce que le pH se tienne acide. La quantité de ClH normal utilisée dépend pour la majeure partie de la quantité de carbonates décomposés et pour une part généralement faible des hydroxydes présents en petite quantité et d'une faible attaque de la phase argileuse. On calcule ainsi une teneur en CO_2 qui est un ordre de grandeur *par excès*. Cette indication est utile pour calculer la prise nécessaire au dosage volumétrique de CO_2 et pour prévoir la marche de l'attaque ménagée.

2° DOSAGE DE LA CHAUX ET DE LA MAGNÉSIE.

Comme il a été décrit plus haut (p. 66) il a été admis que l'attaque à l'acide chlorhydrique décinormal ne mettait en solution que les carbonates, les hydroxydes et les bases adsorbées ou échangeables. Le dosage de la chaux et de la magnésie mesure donc à la fois ces deux bases sous leur état carbonaté et sous leur état adsorbé et échangeable.

Or la magnésie adsorbée et échangeable n'est pas négligeable, mais elle est très difficile à évaluer précisément dans une roche carbonatée. Il est pourtant indispensable de ne pas calculer de la dolomite à partir de magnésium échangeable. C'est pourquoi une approximation a été faite. La magnésie qu'on peut mettre en liberté dans des roches non carbonatées a été mesurée après attaque par l'acide chlorhydrique N/10.

17 mesures ont été faites. Les valeurs extrêmes sont 0,12 % et 1,72 % de MgO . La moyenne est de 1,05 %.

Il sera donc admis que tant que la magnésie sera de l'ordre de grandeur de ces chiffres, il n'y a pas de dolomite dans la roche. Ceci est une décision approximative mais elle est préférable à l'absurdité qui consiste à trouver de la dolomite dans toutes les roches. Par ce moyen, la dolomite ne sera calculée que là où elle est certaine. Tout le risque est d'en négliger une quantité dérisoire par rapport à la calcite, ce qui n'a pas d'importance puisque la majorité des calcaires sont faiblement magnésiens. D'autre part, la présence de dolomite est immédiatement signalée par les Rayons X. Un spectre a été fait sur la roche non traitée dans les cas où il y avait doute. Finalement les raies de la dolomite ne sont pas apparues.

L'attaque chlorhydrique est menée de la manière suivante. La quantité d'acide décinormal à utiliser étant à peu près connue par excès, grâce à la méthode approximative décrite, une prise de roche est finement broyée et mise dans un

bécher, en présence de cette quantité d'acide décinormal, moins 20 %. L'attaque commence, puis elle est terminée au « goutte à goutte ». Le pH de la solution est suivi, soit sous le pHmètre, soit par un réactif coloré. On prend garde qu'il ne dépasse pas 3. L'attaque est terminée à 80° environ. Puis le bécher est mis de côté pendant une nuit. Si la solution est redevenue basique, un peu d'acide est rajouté, jusqu'à ce que le pH reste compris entre 3 et 4.

L'ensemble est alors filtré et analysé, après l'élimination des sesquioxides par le procédé indiqué plus haut. Il faut noter que le fer ferreux peut être présent dans la solution et influer sur le dosage colorimétrique de la magnésie. On peut l'éliminer en traitant par l'eau de brome pour l'oxyder : une ébullition chasse le brome en excès et le fer devenu ferrique précipite. Cette précipitation est complètement terminée à pH 7-7,5.

La chaux est dosée par la méthode pondérale à l'oxalate. La magnésie est dosée colorimétriquement par le jaune de thiazol (LEGENDRE 232, MORET 293).

Le dosage de la chaux se fait de la manière suivante, d'après LASSIEUR (Congrès de Chimie Industrielle, sept. 1946).

On part d'un échantillon qui, d'après l'essai préliminaire contient entre 10 et 20 mg de CaO . On réalise une attaque ménagée à l'acide chlorhydrique N/10 jusqu'à ce que le pH reste acide sans toutefois être inférieur à 3. On chauffe jusqu'à ébullition commençante pour assurer la destruction de la dolomite. En présence d'héliantine et à chaud (70°), on neutralise à l'ammoniaque N/10 jusqu'au virage au jaune franc (pH 5,5). On acidifie légèrement avec l'acide acétique au dixième jusqu'au rose de l'héliantine. On ajoute un excès d'oxalate d'ammoniaque cristallisé (une cuillère à café environ). On laisse précipiter dix minutes à chaud (70°) l'oxalate de chaux. On filtre et on lave le précipité à l'eau bouillante 4 ou 5 fois. On met le filtre avec son précipité dans un Erlenmeyer avec 40 à 50 cm³ d'eau tiède et 2 cm³ de SO_4H_2 concentré. On chauffe à 70° en agitant quelques minutes : il faut faire vite car la cellulose du filtre formerait de l'acide oxalique. Dans la liqueur obtenue on dose les radicaux oxaliques avec une solution de MnO_4K de titre calculé pour que 1 cm³ de cette solution corresponde à 1 mg de CaO .

Le dosage de la magnésie se fait de la manière suivante :

On part d'un échantillon de 100 mg. On réalise une attaque ménagée à l'acide chlorhydrique N/10 jusqu'à ce que le pH reste acide sans toutefois être inférieur à 3. On neutralise avec une solution NH_4OH au trentième en suivant à la touche la neutralisation jusqu'à ce que le bleu de bromothymol vire au bleu franc. Les hydroxydes de fer et d'aluminium précipitent. On filtre et on complète la solution à 100 cm³ avec de l'eau distillée. On prélève 25 cm³ de solution à laquelle on ajoute : 20 cm³ SO_4Ca à saturation, 10 cm³ solution d'amidon soluble à 1 %, 10 cm³ de jaune de thiazol à 0,1 %, 10 cm³ NaOH , 2 N. On complète le tout à 100 cm³ avec de l'eau distillée. On attend environ 5 minutes pour que la coloration se manifeste. On mesure au photomètre à cellule photoélectrique, l'absorption de la lumière par la solution. La longueur d'onde employée pour cette mesure est de 550 mμ. Le chiffre obtenu est comparé à celui que donnent les solutions étalons mesurées dans les mêmes conditions. Dans l'expérimentation utilisée, la courbe d'étalonnage n'est valable qu'entre 0 et 2 mg de MgO . Quand la quantité dépasse on fait un prélèvement plus faible avant l'addition du colorant et du SO_4Ca .

VII - Dosage du quartz et des insolubles

Beaucoup de roches argileuses contiennent des minéraux détritiques où le quartz représente l'élément de beaucoup le plus abondant. Il est important pour juger des conditions de sédimentation d'évaluer cette phase détritique. La solution la meilleure est de faire une attaque vigoureuse à l'acide sulfurique qui ne laisse guère subsister que quartz, feldspath et zircon. Ainsi disparaissent quelques minéraux détritiques comme la muscovite, l'ilménite, le rutile, la magnétite, mais qui ne forment qu'une part infime de la phase détritique; l'ordre de grandeur de celle-ci se trouve déterminé. Il a donc été admis que la quantité de produits détritiques est évaluée par la quantité des produits insolubles et ceci est une approximation caractéristique et suffisante, puisque le quartz en forme presque toujours plus de 90 %. Une appréciation des minéraux détritiques dissous se fait sur le produit de lavage de la roche.

La méthode utilisée est la suivante :

On prend un gramme de roche finement pulvérisée. On élimine le carbonate. On attaque par 10 cm³ SO₄H₂ pur jusqu'à évaporation complète sur la flamme. On reprend par 10 cm³ de ClH pur à l'ébullition pendant 10 minutes. On lave, on décante et on filtre. On reprend par 10 cm³ de NaOH, 10 N., à l'ébullition pendant 10 minutes. On lave, on décante, on filtre et on sèche. Si les quartz ne sont pas libérés par ce traitement même renouvelé, on réalise une attaque ménagée au bisulfate. On attaque le résidu par 5 g. de SO₄KH au rouge dans un creuset de platine. On reprend comme précédemment par HCl et NaOH.

Cette méthode est satisfaisante, mais n'est pas exempte de critique : l'action de la soude et surtout du bisulfate n'étant pas nulle sur le quartz en particules fines.

VIII - Etude des minéraux en grains et organismes

Le dosage des insolubles a donné une bonne idée quantitative de la phase détritique contenue dans la roche sédimentaire. Mais certains des minéraux détritiques ont été détruits par le dosage. D'autre part, d'autres minéraux en grains ne sont pas détritiques mais secondaires et peuvent être intéressants : pyrite, gypse, etc... Enfin, les foraminifères et les restes organiques doivent être inventoriés. C'est l'ensemble de ces constituants qui sont isolés par la méthode suivante. Mais cette étude ne peut se faire que pour les roches qui forment naturellement une boue avec l'eau, ce qui permet

d'éliminer les particules argileuses. D'autre part, ne sont étudiées que les particules qui restent sur les tamis 60-80 et 100. Mais ceci est considéré comme donnant de la phase granuleuse de la roche une image qualitative suffisante, la mesure quantitative se faisant par le dosage des insolubles. La méthode utilisée est la suivante :

Un échantillon de 30 grammes de roche est mis dans environ un litre d'eau additionnée d'ammoniaque décinormale qui facilite la dispersion. Il est nécessaire de laisser la roche se déliter naturellement ainsi pendant 12 heures environ. Trois tamis de mailles 60 — 80 et 100 sont superposés et la boue argileuse est versée sur le tamis supérieur. Un jet d'eau assez vigoureux aide le tamisage de telle sorte que les fines particules argileuses soient évacuées et que les parties plus volumineuses restent sur les trois tamis successifs.

1° *Organismes.* — A chaque tamis correspond un lot qui sera étudié séparément pour la recherche des foraminifères et des organismes. Dans chacun de ces lots les organismes sont prélevés avec une aiguille sous la loupe binoculaire et étudiés. On s'efforce de respecter dans les prélèvements la fréquence des différents organismes les uns par rapport aux autres.

2° *Minéraux en grains.* — Les minéraux en grains constituent le résidu non organique du produit de lavage. Ils sont fréquemment mêlés de débris de roche ayant résisté au jet d'eau. Sont étudiés sous la loupe binoculaire les cristaux de quartz, de muscovite, de magnétite, de pyrite, de gypse, de calcite. La muscovite détritique a généralement un diamètre trois fois supérieur à celui des quartz qui l'accompagnent. Les grains de quartz peuvent être étudiés pour eux-mêmes et ceci pour donner de très utiles renseignements sur la genèse. La morphoscopie de CAILLEUX (54 bis) peut être utilisée (Exemple Sommancourt, n° 47, figure 13).

IX. - Le Ph des suspensions de roches argileuses

Un certain nombre d'indications m'ont amené à vouloir mesurer pour chaque roche argileuse un pH qui puisse la caractériser dans son état naturel telle qu'elle se trouve. Ceci mérite quelques précisions.

1° Le pH d'une argile ou le pH d'une roche argileuse est une locution qui ne signifie rien. Le pH est une notion physico-chimique qui ne peut caractériser qu'une solution. Une suspension à 10 % d'argile dans l'eau distillée a été réalisée pour tous les échantillons. C'est donc le pH de la solution aqueuse dans laquelle l'argile est en suspension qui est mesuré. En opérant toujours de la même manière on a des résultats qu'on peut considérer comme caractéristiques des roches mises en suspension.

2° L. LONGCHAMBON et ZAJTMAN (245) ont montré que le pH des suspensions argileuses varie avec la concentration. Pour les terres basiques il croît avec la concentration croissante et se stabilise pour une concentration de 5 % de terre dans l'eau. Pour les terres acides, il baisse avec la concentration croissante et se stabilise pour 2 %. On est à l'abri de ces variations pour des suspensions à 10 % de terre dans l'eau distillée.

3° LONGCHAMBON et ZAJTMAN (245) ont montré que les solutions épaisses ne permettaient d'obtenir l'équilibre qu'au bout d'un temps plus long. On est à l'abri de cet inconvénient en travaillant sur une solution à 10 % et en laissant l'équilibre s'établir pendant 12 heures avec agitation.

4° BRAMMALL et LEECH (44-45) ont montré que le pH des minéraux constituant les roches augmente avec la division. C'est pourquoi la roche sera broyée si elle ne forme pas naturellement une boue fine avec l'eau.

La mesure du pH a été faite avec un pHmètre JOUAN à électrode de verre selon la méthode utilisée par A. RIVIERE qui est décrite dans MUNIER et RIVIERE (297). Pour éviter que le KCl quent de libérer des ions Cl, la fermeture du circuit est assurée ne vienne dans la suspension argileuse où les ions K adsorbés risquent par la petite bandelette de papier filtre imbibée de KCl sur presque toute sa longueur.

CONCLUSION.

Les mesures de pH ont été faites sur des suspensions à 10 % en roche argileuse. 10 gr. de roche est mise dans 100 cm³ d'eau. Si la roche ne se délite pas naturellement dans l'eau elle est finement broyée. De plus, la suspension est agitée pendant une nuit.

X. - Formule et représentations graphique d'une roche argileuse

L'inventaire fait plus loin parmi les roches argileuses montre qu'il est extrêmement rare que cette roche ne contienne qu'une phase argileuse. Il peut être intéressant de résumer, par une formule simple ou un graphique, le résultat d'une analyse pétrographique de roche.

A) FORMULE REPRÉSENTATIVE D'UNE ROCHE ARGILEUSE SÉDIMENTAIRE.

On désignera par C : la phase carbonatée en précisant entre parenthèses s'il s'agit de calcite (cal) ou de dolomite (dol);

par I : les insolubles constitués principalement par du quartz;

par Fe : les sels de fer qui seront exprimés sous la forme où ils sont déterminés par les observations pétrographiques (Pyrite, hydroxyde, magnétite).

Le gypse, la muscovite, quand ils sont présents, seront désignés par leur nom.

On désignera par A la phase argileuse en précisant entre parenthèses la nature des minéraux argileux déterminés et leurs proportions approximatives. Les minéraux argileux seront représentés par les lettres suivantes : K. pour la Kaolinite, I. pour l'Illite, M. pour la Montmorillonite, H. pour l'Hydrobiotite, V. pour la Vermiculite, Att. pour l'Attapulgitte, Sép. pour la Sépiolite, et C. pour la Chlorite.

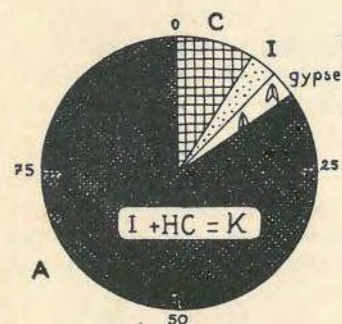
L'utilisation de toutes ces conventions mène à une formule du genre des suivantes, où chaque fraction de la roche est accompagnée d'un chiffre donnant son pourcentage.

EXEMPLES : A Formule de la Marne de Jeandelaincourt (Graphique Figure 2).

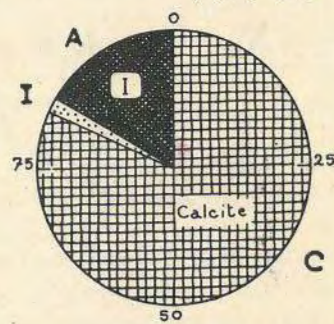
C 9,6 + I 1,3 + Gypse 3 + Fer 1,68 (Pyrite) + A 84 (I + HC = K).

B Formule du Calcaire lacustre de Gergovie n° 38 (Figure 2).

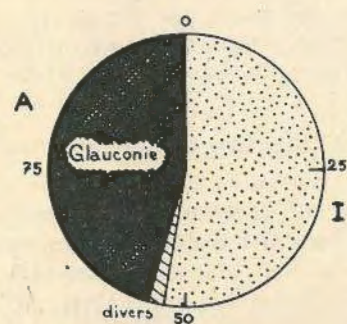
- C 84,25 + I 0,6 + Fer 0,24 (sesq) + A 14 (I).
 C Formule du Grès vert de Moeslains n° 20 (Figure 2).
 C 0 + I 52,2 + Opale 2,7 max + Fer 0,42 (sesq) + A 44 (Glauc).
 D Formule de la Marne à Gypse de Rosières-aux-Salines n° 32 (Figure 2).
 C 26,1 (cal) 14,45 (dol) + I 1,8 + Gypse 24% + Fe 0,5 (sesq) + A 33
 (I >>>> H)



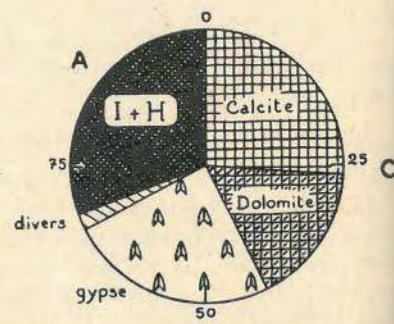
Marne de Jeandelaincourt



Calcaire argileux de Gergovie



Grès vert de Moeslains



Marne à gypse de Rosières aux Salines

FIGURE 2. — Quelques diagrammes représentatifs de roches sédimentaires argileuses.

Les signes qui marquent une inégalité sont à interpréter de la manière suivante :

- I >>>>> K 90 % d'Illite, 10 % de Kaolinite.
 I >>>> K 80 % d'Illite, 20 % de Kaolinite.
 K >>> I 70 % de Kaolinite, 30 % d'Illite.
 Att >>>>>> I 100 % d'Attapulgite, traces d'Illite.
 M=K 50 % de Montmorillonite, 50 % de Kaolinite.

B) DIAGRAMMES REPRÉSENTATIFS DES ROCHES ARGILEUSES.

Ces indications peuvent être reportées immédiatement sur un diagramme. Le graphique triangulaire a été éliminé car il ne permet pas la figuration des composants assez fréquents autres que les trois composants cardinaux. Carbonates (C), Insolubles (I), et Argile (A).

Le diagramme circulaire par contre peut être utilisé. La figure 2 montre quelques exemples de tels graphiques.

CHAPITRE TROISIÈME

MÉTHODES D'ÉTUDE DE LA PHASE ARGILEUSE

La phase argileuse a été définie précédemment comme la fraction proprement argileuse qu'on peut extraire d'une roche sédimentaire. Elle constitue le souci principal de ce travail. Les méthodes qui permettent de la connaître sont variées et se perfectionnent sans cesse. Celles qui sont exposées ici ont souvent été choisies par rapport à d'autres aussi bonnes par leur simplicité d'application ou leur rapidité d'exécution. En effet, toutes ces techniques sont longues et délicates et quand des essais sont systématiques sur un grand nombre de roches, un certain rendement est nécessaire pour que le travail ne s'étale pas sur de trop nombreuses années. Les méthodes seront exposées le long des paragraphes suivants :

- I — Extraction de la phase argileuse.
- II — Dispersion mécanique et ultrasonique.
- III — Utilisation des Rayons X.
- IV — Utilisation de l'analyse thermique différentielle.
- V — Utilisation de l'analyse chimique et calcul des formules des minéraux.
- VI — Méthodes diverses.

I. - Extraction de la phase argileuse

La première chose à faire pour étudier la phase argileuse est d'en posséder une fraction qui soit composée autant que possible *exclusivement* du ou des minéraux argileux contenus dans la roche. Le but recherché n'est pas d'extraire toute la phase argileuse, ce qui serait long et sans utilité ici, mais d'en extraire une partie aussi propre que possible. L'opération se passe en plusieurs temps :

- 1° Mise en suspension.
- 2° Elimination des matières organiques.
- 3° Elimination des carbonates, hydroxydes et cations flocculants.
- 4° Mise en suspension en milieu déflocculant.

5° Dispersion.

6° Fractionnement par sédimentation.

On trouve une discussion de ces questions dans les travaux de P. URBAIN (370, 374) et A. RIVIERE (329, 297). Je n'exposerai ici que le schéma utilisé.

1° MISE EN SUSPENSION.

Il existe des roches qui se délitent naturellement dans l'eau mais elles peuvent contenir des concrétions même microscopiques qui seront longues à se dissoudre par l'attaque acide et gêneront la marche des opérations. C'est pourquoi dans tous les cas la roche est broyée et passée au tamis 100 avant d'être mise en suspension dans l'eau distillée. Pour aboutir, sans difficulté, à une fraction argileuse suffisante aux essais par les Rayons X, l'analyse thermique et l'analyse chimique, on part d'un poids de 30 g. de roche. Toutefois, si celle-ci contient moins de 20 % d'argile, on augmente la prise. La roche pulvérisée et tamisée est donc mise dans l'eau distillée pendant une nuit.

2° L'ÉLIMINATION DES MATIÈRES ORGANIQUES.

Selon la méthode internationale, la suspension est traitée par apports répétés de H_2O_2 , à 6 % en volume, au bain-marie. La suspension est filtrée. Cette attaque est nécessaire pour éliminer les substances humiques qui risquent de fonctionner comme colloïdes protecteurs au cours de la dispersion et de gêner celle-ci.

3° L'ÉLIMINATION DES CARBONATES, DES HYDROXYDES ET DES CATIONS FLOCCULANTS

est importante. Elle se fait par une attaque ménagée à l'acide chlorhydrique décinormal. Cette opération tient compte de tous les arguments développés au chapitre précédent. Une attaque brutale donne l'ordre de grandeur d'acide à utiliser. Puis l'attaque est faite avec prudence selon le schéma déjà décrit (n. 470). On filtre: on lave deux fois à HCl N/10, deux fois à HCl N/100 et autant de fois qu'il est nécessaire à l'eau distillée pour que les traces de chlore ne soient plus reconnaissables à l'azotate d'argent dans le liquide filtrant. Quand la roche contient de la Dolomite, les lavages acides doivent être répétés parfois plusieurs jours avant que les rayons X n'en montrent plus trace. Ceci est surtout important pour la bonne réalisation de l'analyse chimique.

4° MISE EN SUSPENSION EN MILIEU DÉFLOCCULANT.

Les lavages acides ont éliminé de la suspension les cations flocculants et en particulier Ca^{++} et Mg^{++} . Pour faciliter la dispersion

de la fraction argileuse, il faut la mettre en milieu déflocculant. De nombreux produits sont possibles: Citrate de Na (DEMOLON et BASTISSE, 85), Oxalate d'ammoniaque ou pyrophosphate de Na (RIVIERE 329). On a choisi ici l'ammoniaque ajouté à la suspension, de façon à lui communiquer un pH de 9. En effet, ce produit s'échappe quand on sèche la poudre argileuse et ne vient pas fausser les analyses chimiques.

REMARQUES. — 1° On n'a pas appliqué aux roches la méthode de DEMOLON et BASTISSE (85) qui consiste à remplacer les ions Ca par le K en traitant au ClK. L'opération est beaucoup trop longue et AUBERT (6 bis) avait déjà remarqué qu'elle ne s'appliquait que fort mal aux argiles calcaires, qui forment la majorité de nos prélèvements.

2° On n'a pas utilisé, pour la préparation des fractions argileuses, l'électrodialyseur Prolabo du laboratoire, et ceci pour trois raisons: d'abord les quantités à traiter étaient trop importantes; ensuite, les quantités d'ions à extraire étaient très considérables. Enfin il n'est pas démontré que l'électrodialyse n'a pas une action sur les minéraux argileux. KELLEY a discuté cette question (193) et MATTSON (272) a montré que les suspensions collées aux membranes cathodiques et anodiques n'avaient pas la même composition. Enfin THALA (359) est parvenu à arracher des ions aux principaux minéraux des roches cristallines soumis à l'électrodialyse.

3° La séparation de la fraction argileuse des marnes peut se faire en mêlant à la suspension des substances colloïdales protectrices (DREYFUSS 98). On évite ainsi de détruire les carbonates, donc d'attaquer la phase argileuse, mais cet inconvénient reparaît quand on veut détruire la substance protectrice.

5° DISPERSION.

La suspension étant mise en milieu déflocculant, il faut la disperser. En effet, les minéraux argileux sont volontiers groupés en agrégats. Ces agrégats doivent être rompus pour les raisons suivantes: d'abord parce qu'ils risquent de retenir des particules étrangères en leur sein; ensuite pour augmenter dans la suspension la proportion des fines qui sont recherchées. La méthode habituelle utilisée pour la dispersion est une agitation mécanique. J'en ai étudié la marche quantitativement sur quelques échantillons et j'ai commencé l'étude de la dispersion des matières argileuses aux ultrasons. Ces recherches font l'objet du chapitre spécial suivant. Pour l'instant, on supposera la dispersion faite dans de bonnes conditions et la suspension dispersée va être fractionnée par sédimentation.

6° LE FRACTIONNEMENT PAR SÉDIMENTATION.

La suspension argileuse dispersée et défloculée est stable. On la met dans un récipient haut et étroit et on la laisse se décanter. Les particules se sédimentent selon leur taille et des prélèvements sont faits à la pipette d'Atterberg (RIVIERE 329) (MUNIER et RIVIERE 297). La loi de chute des particules est complexe; en effet, elles ont la forme de feuilles et ne peuvent être assimilées à des sphères. On est obligé, devant la complexité des phénomènes, de raisonner sur le rayon d'une sphère qui descendrait avec la même vitesse que la particule en question : on nomme ce rayon imaginaire rayon équivalent.

La loi de Stokes s'applique et les produits se classent par ordre de rayons équivalents décroissants. Le problème a été exposé récemment par MUNIER et RIVIERE (298) et leurs tableaux de chiffres ont été utilisés.

Pour l'analyse chimique, le prélèvement a été fait à 8 cm. de profondeur après 96 heures de sédimentation: les particules étaient donc inférieures à 0,5 μ . Ceci est important car l'analyse chimique exige une fraction argileuse aussi exempte que possible de minéraux étrangers à la phase argileuse. Il est vrai qu'il n'existe pas de limite théorique à la finesse des grains de quartz mais des essais aux rayons X ont montré que les raies du quartz étaient presque totalement atténuées pour cette taille.

Pour l'analyse aux rayons X, le prélèvement a été fait au bout de 6 heures à une profondeur de 8 cm. Les particules étaient inférieures à 2 μ (Voir chapitre sur les rayons X).

Pour l'analyse thermique, le quartz est inerte et la finesse de l'échantillon importe moins. On a choisi 5 μ .

Il est donc possible de répartir les différentes fractions de la suspension entre les différents usages et ainsi d'en faire l'utilisation la plus économique.

II. - Dispersion mécanique et ultrasonique

1° UTILITÉ DE LA DISPERSION.

Le pétrographe, aussi bien que les autres chercheurs qui s'intéressent aux argiles, a intérêt à connaître dans le matériau qu'il étudie ce qui est essentiellement « argile », à l'état de pureté maximum. On a toujours cherché à satisfaire cette ambition en triant mécaniquement les matériaux de façon à séparer les particules les plus fines. Les tailles extrêmement petites des minéraux argileux risquent de les rendre abondants dans cette fraction fine par rapport aux matériaux non colloïdaux. En effet, bien qu'il n'y ait pas de limite théorique à la résolution des minéraux comme le quartz en particules très fines, en pratique, la proportion de ces minéraux baisse dans les fractions très fines quand on a affaire à un produit naturel. Elles deviennent inappréciables aux rayons X pour une certaine finesse qui varie avec les roches. Obtenir donc une fraction argileuse pure revient à obtenir une fraction fine de la roche (les autres matières colloïdales de la roche peuvent en effet être évacuées par des traitements chimiques).

Une fraction argileuse sera d'autant plus pure qu'elle sera plus fine, or il était connu — et le microscope électronique l'a confirmé — que les minéraux argileux sont groupés « dans les argiles » en agrégats. Une dispersion de ces agrégats est nécessaire pour augmenter la fraction fine.

2° TRAVAIL ENTREPRIS.

Certaines roches particulièrement rétives à la dispersion mécanique ont suggéré l'utilisation des ultrasons. Ainsi fut entreprise l'étude suivante avec l'aide de G. NOISETTE (G. MILLOT et G. NOISETTE 290). Elle consiste en un début d'application de la dispersion ultrasonique aux roches argileuses. La comparaison des résultats obtenus avec ceux de l'analyse mécanique a été faite.

3° APPRÉCIATION DE LA DISPERSION.

Pour apprécier le degré de la dispersion d'une suspension il suffit de savoir apprécier la proportion d'éléments fins qu'elle contient. Parmi les méthodes possibles, nous avons choisi la néphélogéométrie.

4° CRITÈRE D'UNE BONNE DISPERSION.

Il est admis que pour un matériau donné le critère d'une bonne

dispersion est qu'aucun autre procédé ne puisse donner une proportion plus considérable en éléments fins et ultrafins (MUNIER et RIVIERE 296).

5° PRÉPARATION DES SUSPENSIONS.

La préparation des suspensions devant être soumise à la dispersion, qu'elle soit mécanique ou ultrasonique, a été faite de la manière suivante :

A) Elimination des cations à pouvoir flocculant élevé et en particulier des cations alcalino-terreux par la méthode décrite précédemment.

B) Réalisation d'un milieu de pH convenable déflocculant. Afin d'éviter qu'au cours des agitations le pH ne varie, la suspension est stabilisée au moyen d'un tampon à pH 9 (tampon borate de soude). Ce tampon, utile pour garantir un pH constant au cours de l'agitation mécanique, est indispensable pour l'agitation ultrasonique. Les ultrasons, en effet, agissent sur les corps en solution et généralement les oxydent; ils agissent même sur l'eau (formation de H_2O_2). Des variations de pH importantes risqueraient d'être obtenues en cours de traitement et les comparaisons deviendraient illusoires.

C) Une concentration judicieuse a été choisie en tenant compte des deux exigences suivantes qui s'accordent. D'abord le degré de dispersion décroît quand la concentration augmente et il est préférable de travailler à des concentrations faibles; ensuite les suspensions terminales doivent être claires pour permettre une étude au néphélomètre. Cet appareil ne donne de bons résultats que si les concentrations sont faibles. Ces concentrations varient avec les roches expérimentées selon leur plus ou moins grande aptitude à la dispersion; elles sont établies après des essais préliminaires.

6° AGITATION MÉCANIQUE.

L'agitation mécanique a été réalisée par un appareil à agitation mécanique de laboratoire battant toujours à la même cadence, de façon à ce que le temps de l'agitation soit la seule variable.

7° APPAREIL A ULTRASONS.

L'appareil utilisé (1) se compose d'un générateur de courant à haute fréquence (970.000 par/sec.). Ce courant est engendré par un circuit oscillant à haute fréquence entretenu par une lampe

(1) L'appareil à ultrasons utilisé appartient au Docteur Marcel VERAINE, de Nancy, qui le mit à notre disposition avec son obligeance coutumière.

d'émission d'environ 1 kilowatt. La fréquence est réglable à l'aide d'un condensateur. La puissance émise à la sortie est d'environ 300 watts sous 3.000 volts et 970.000 p/seconde. Le générateur d'ultrasons (Société S.C.A.M.) est un quartz circulaire de 6 centimètres de diamètre et de 3 millimètres d'épaisseur. L'anode actionnant le quartz est baigné dans du pétrole déshydraté.

8° AGITATION ULTRASONIQUE.

Les suspensions identiques à celles qui ont été soumises à l'agitation mécanique furent soumises à l'agitation ultrasonique dans des ampoules de verre à fond de papier d'aluminium. La fréquence et la puissance étaient maintenues constantes de façon à ce que la seule variable soit le temps.

Des expériences préliminaires avaient montré une dispersion vigoureuse par les ultrasons.

A) Une argile traitée mécaniquement (Damelevières) était arrêtée par le filtre. Passée aux ultrasons pendant 15 minutes, elle le traversa.

B) Une suspension argileuse non débarrassée de ses cations flocculants (Louvemont) avait été traitée aux ultrasons par fractions égales en des temps croissants. Mises au repos dans des éprouvettes à pied, un ménisque apparut dans chaque éprouvette au fur et à mesure de la floculation. Les niveaux des ménisques pour les essais successifs après repos de 24 h. indiquent l'augmentation du degré de dispersion avec le temps de traitement et par là l'avantage des ultrasons (Voir figure 3).

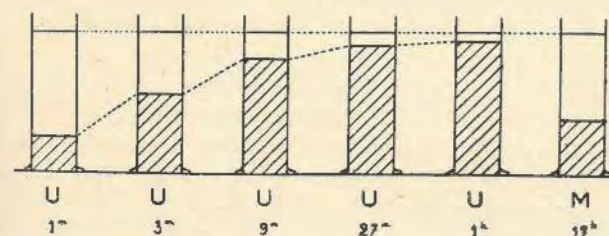


FIGURE 3. — Essai de dispersion aux ultrasons sur des suspensions argileuses non débarrassées des cations flocculants : les ultrasons agissant 3 minutes sont plus efficaces que 17 heures d'agitation mécanique.

Cependant la complexité du phénomène de la floculation rendait toute analyse sérieuse impossible, d'où la méthode utilisée sur des fractions argileuses déflocculées.

9° MESURE DES RÉSULTATS.

Les résultats sont appréciés au néphélomètre. Aussitôt après l'agitation, la suspension est mise au repos dans les cuves d'un néphélomètre. Les cuves sont montées sur un chargeur qui permet de les faire défiler devant une cellule photoélectrique. L'ensemble est laissé au repos pendant un temps suffisant pour amener la sédimentation d'une taille donnée. Au bout de douze heures les particules de $1\ \mu$ ont parcouru les 4 cm. de la cuve et le faisceau lumineux du néphélomètre apprécie la quantité de particules inférieures à $1\ \mu$ au niveau où il traverse la cuve.

On lit sur le tambour le pouvoir absorbant de la suspension évalué par $\text{Log } I_0/I$, I_0 étant l'intensité lumineuse traversant l'eau distillée et I l'intensité traversant la suspension. On obtient pour chaque suspension un chiffre croissant avec le temps d'agitation mécanique ou ultrasonique. Pour savoir à quelle quantité de particules égales ou inférieures à $1\ \mu$ ce pouvoir absorbant correspond, on bâtit une courbe d'étalonnage.

10° ÉTALONNAGE.

Une courbe d'étalonnage est établie pour une série de suspensions de plus en plus claires. Cette courbe donne le poids de particules inférieures ou égales à $1\ \mu$ en fonction du pouvoir absorbant mesuré au néphélomètre ($\text{Log } I_0/I$). Pour établir cette courbe, 100 cm³ de suspension sont préparés ne contenant que des particules inférieures à $1\ \mu$. Sur ces 100 cm³, 50 sont prélevés et séchés. Le poids sec donne la concentration de la suspension initiale. Sur les 50 cm³ restants et agités sans cesse, des prélèvements sont faits pour réaliser des suspensions de concentration décroissante. Les pouvoirs absorbants de ces dernières sont mesurés au néphélomètre après 12 h. de repos comme pour les solutions qu'elles doivent servir à étalonner. Ainsi des conditions identiques sont garanties. La courbe d'étalonnage est constante. En abscisse, se trouvent portés les pouvoirs absorbants indiqués par le néphélomètre. En ordonnée, le poids de substance de taille inférieure ou égale à $1\ \mu$ contenu dans 1 cm³ des suspensions étalons avant repos.

11° DISPERSION DU SABLE VERT DE MOESLAINS. ALBIEN (HAUTE-MARNE).

Le sable vert de Moeslains est un sable glauconieux qui se disperse difficilement par agitation mécanique. En effet, la glauconie se trouve comme à l'habitude groupée en agrégats cryptocristallins de forme sphérique qui résistent bien à la dispersion. Le tableau suivant donne en milligramme le poids de particules de taille infé-

rieure ou égale à $1\ \mu$ contenu dans 1 cm³ en fonction du mode de traitement et du temps.

Temps	1'	3'	9'	27'	1 h.	3 h.	19 h.
Mécanique	0,22	0,65	0,85	1,02	1,16	1,45	1,50
Ultrasons	2,20	3,05	3,25	3,40			

Ces résultats sont représentés sur la figure n° 4.

De ces chiffres, on peut tirer les renseignements suivants :



FIGURE 4. — Comparaison des dispersions mécanique et ultrasonique (en ordonnée : degré de dispersion mesuré par le poids en mg de particules inférieures à $1\ \mu$ contenues dans 1 cm³).

a) Comparaison du degré de dispersion par les deux procédés en un même temps. — En 1 minute d'ultrason, la dispersion ultrasonique est 10 fois plus importante. En 3 minutes, 5 fois. En 9 minutes, 4 fois et en 27 minutes, 3 fois 1/2. Le palier de la courbe aux ultrasons est pratiquement atteint.

On voit que le bénéfice du traitement ultrasonique baisse avec le temps mais ce traitement reste 2 fois plus vigoureux à son maximum que le traitement mécanique appliqué pendant les temps les plus longs.

b) *Comparaison de la puissance des procédés.* — La puissance du procédé de dispersion sera le poids de matière dispersée par unité de temps. Cette puissance varie au fur et à mesure que la dispersion avance. On voit que la puissance du procédé aux ultrasons est de $\frac{2,2}{60}$ pour 1 minute de traitement contre $\frac{1,5}{19 \times 60 \times 60}$

pour 19 h. d'agitation mécanique. Les ultrasons sont donc 1.600 fois plus puissants en une minute que l'agitation mécanique totale. Enfin, au palier des courbes, c'est-à-dire pour la durée du traitement qui donne le résultat maximum, le rapport des puissances est encore de :

$$\frac{3,40}{27 \times 60} : \frac{1,5}{19 \times 60 \times 60} = 100 \text{ environ.}$$

12° DISPERSION DE LA ROCHE KAOLINIQUE DE SOMMANCECOURT. BARRÉMIEN (HAUTE-MARNE).

La méthode essayée sur le grès vert qui se disperse difficilement, a donné des résultats intéressants. On a cherché à l'appliquer à une terre argileuse plus courante et obéissant bien à la dispersion. Cette roche est composée de Kaolinite nettement dominante sur l'illite. Elle fut employée autrefois comme réfractaire.



FIGURE 5. — Comparaison des dispersions mécanique et ultrasonique.

Le tableau suivant donne les résultats numériques :

Temps	1'	3'	9'	27'	1 h.	3 h.	17 h.
Mécanique	0,23	0,25	0,255	0,265	0,27	0,275	0,28
Ultrasons	0,25	0,275	0,29	0,30	0,30		

Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure n° 5.

De ces chiffres, on peut tirer les remarques suivantes :

a) Les deux courbes sont à peu près parallèles.

b) Les poids dispersés sont assez voisins. Le rapport des poids dispersés par l'agitation ultrasonique aux poids dispersés par agitation mécanique sont de 105/100 au bout d'une minute et de 108/100 au palier des courbes. Le bénéfice est faible.

c) La comparaison des puissances aux maximum des deux techniques est à l'avantage des ultrasons mais l'intérêt n'est pas considérable.

Ces faits permettent de conclure de la manière suivante : à l'état naturel, l'argile était bien dispersée. Dès qu'un procédé de dispersion est mis en œuvre, la dispersion est tout de suite voisine de son maximum. On peut tout au plus dire que les ultrasons brisent une quantité un peu plus forte d'agréats ou de particules.

13° DISPERSION DE LA ROCHE ILLITIQUE DE DEYVILLERS. MUSCHELKALK (VOSGES).

Cette roche contient dans sa phase argileuse l'illite comme minéral nettement dominant. Elle a donné des résultats analogues. Pour les analyser de plus près, les suspensions ont été diluées de façon à pouvoir utiliser l'échelle logarithmique du néphélomètre vers son origine. C'est dans cette région qu'elle est la plus précise. Les concentra-

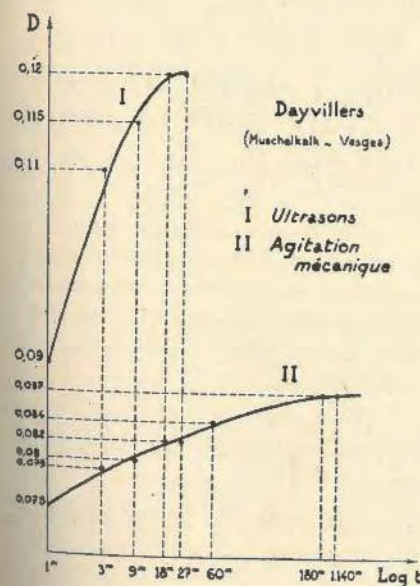


FIGURE 6. — Comparaison des dispersions mécanique et ultrasonique.

tions utilisées furent de 1/1.000 et aboutirent à des suspensions très claires. Le tableau suivant donne les résultats numériques :

	1'	3'	9'	18'	27'	1 h.	3 h.	17 h.
Temps								
Mécanique	0,075	0,079	0,080	0,082	0,082	0,084	0,087	0,087
Ultrasons	0,09	0,11	0,115	0,12	0,12			

Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure n° 6.

De ces chiffres, on peut tirer les remarques suivantes :

- a) Les deux courbes ne sont pas parallèles.
- b) Le rapport des poids dispersés par l'agitation ultrasonique aux poids dispersés par l'agitation mécanique est de 120/100 au point de départ (1 minute) et 140/100 au palier des courbes ; ces rapports sont assez voisins.
- c) Mais le résultat maximum par les ultrasons est obtenu plus vite que par l'agitation mécanique. Aussi la pente de la courbe ultrasonique est plus raide que l'autre.

- d) Le rapport des puissances des deux techniques utilisées l'une pendant 27 minutes (U.S.) et l'autre pendant 17 heures est de 50.

Ces faits permettent de conclure de la manière suivante :

La phase argileuse était naturellement bien dispersée dans cette roche et dès qu'une dispersion est commencée, on se rapproche de l'optimum. Les ultrasons cependant dispersent plus vite que l'agitation mécanique. D'autre part, ils permettent une dispersion légèrement plus importante.

14° RÉSULTATS D'UNE ÉTUDE DE LA DISPERSION MÉCANIQUE ET ULTRASONIQUE EN FONCTION DU TEMPS.

Les conclusions suivantes peuvent être faites à la suite de cette étude sur la dispersion :

- A) Il est admis habituellement qu'une bonne dispersion par agitation mécanique ne peut être acquise qu'après 17 heures d'agitation (329). Cette limite est extrêmement variable avec les matériaux argileux. Suivant la force qui réunit les agrégats entre eux, le temps mis pour les disperser varie. Cette limite peut s'abaisser à 1 heure comme pour la roche de Sommacourt.

- B) Les argiles difficiles à disperser par agitation mécanique peuvent l'être par les ultrasons avec des rendements 20, 50, 100, 1.000 ou 1.500 fois meilleurs suivant les cas.

La méthode de dispersion aux ultrasons trouve là une application importante pour l'étude des roches où la cimentation des particules argileuses est déjà assez poussée.

- C) Il existe des argiles dont la dispersion naturelle est excellente si bien qu'un procédé ultrasonique n'a qu'un faible intérêt pratique, une agitation mécanique courte parvenant à un résultat à peine inférieur.

- D) Il n'existe pas de mode de dispersion parfait.

Parler d'une suspension parfaitement dispersée ne signifie rien. On peut toujours trouver un procédé qui assure une meilleure libération des phyllites argileuses entre elles.

- E) Les courbes granulométriques d'argile ont un intérêt pratique dans certains cas. On voit ici que ces courbes peuvent dépendre beaucoup plus du mode de dispersion utilisé que du matériau lui-même. C'est pourquoi le chercheur qui s'intéresse à la granulométrie naturelle d'une argile, doit non seulement utiliser toujours rigoureusement la même méthode mais encore choisir celle qui disperse le moins car on peut s'écarter beaucoup avec des méthodes vigoureuses, de la granulométrie naturelle d'une roche.

- F) Par contre, quand on cherche à extraire une fraction argileuse pure, la méthode de dispersion la plus vigoureuse est la meilleure. Par l'obtention d'une fraction fine abondante l'analyse chimique sera exempte d'erreur. D'autre part, en songeant au chapitre suivant, la libération des phyllites les unes des autres permet la confection de plaquettes d'argile orientée par sédimentation de bonne qualité et les spectres de rayons X seront meilleurs.

15° ÉTUDE DE L'INFLUENCE DE LA PUISSANCE ET DE LA FRÉQUENCE DANS LA DISPERSION AUX ULTRASONS.

A. MATHIEU-SICAUD et G. LEVASSEUR (268) ont suivi avec le microscope électronique l'effet des ultrasons sur les suspensions aqueuses de SO_4Ba puis ils ont appliqué (267) leur technique aux minéraux argileux purs. En particulier, ces auteurs ont complété nos études en faisant varier la fréquence ultrasonore. Ils ont montré que le degré de dispersion varie avec la fréquence et passe par un maximum différent pour les échantillons de Kaolinite et de Montmorillonite qu'ils ont utilisés. Ils ont montré en outre que chaque fréquence ultrasonore correspond à une dimension particulière différente qui s'échelonnait de 1μ à $1.000 \text{ \AA}$. La dispersion par les ultrasons menée de pair avec l'observation au microscope électronique (ALAIS, FOUCHECOUR et REIS, 1 — ANGLADE et REIS, 5) sera certainement très instructive pour l'étude des suspensions argileuses.

III. - Utilisation des Rayons X

1^{re} MÉTHODES DES POUDRES ET SON APPLICATION.

Les minéraux argileux sont tellement ténus qu'il n'est pas possible d'utiliser pour leur étude roëntgenographique la méthode de Laue Friedrich et Knipping, non plus que la méthode du cristal tournant. On applique aux minéraux argileux la méthode mise au point simultanément par Debye et Scherrer et par Hull : la méthode des poudres.

A) Méthode ordinaire.

La matière pulvérulente est collée sur un support très fin, de manière à former un petit bâtonnet cylindrique. Le support utilisé est une baguette de verre étiré. Ce dispositif donne sur le spectre des anneaux concentriques. Cette méthode fut utilisée dans ce travail quand la fraction argileuse des roches a refusé de rester cohérente en plaquette après sédimentation. Ceci peut arriver pour la fraction argileuse après son extraction mais plus souvent quand on lui fait subir certains traitements.

INTERPRÉTATION DES DIAGRAMMES

L'interprétation des diagrammes se fait schématiquement de la manière suivante : les anneaux de diffraction sont la trace du cône de rayons diffractés par les plans de grande densité réticulaire sur le film. L'ouverture angulaire de ce cône (4θ) est calculée à partir du diamètre mesuré des anneaux par une règle de trois en sachant que 360° correspond au périmètre connu de la chambre. Puis la distance réticulaire correspondante à chaque anneau est calculée en appliquant

la relation de BRAGG : $d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$ où d représente la distance réticulaire

cherchée, λ la longueur d'onde utilisée et θ le $1/4$ de l'ouverture angulaire calculée précédemment.

B) Méthode des plaquettes orientées.

La majorité des suspensions argileuses forment des croûtes quand on les fait sécher. De plus, si cette dessiccation a lieu sur une surface régulière horizontale et sans que la suspension soit agitée au cours du dépôt, les particules argileuses s'orientent en se sédimentant à plat parallèlement à leur plan de clivage. Cette propriété a été utilisée pour la première fois par CLARK, GRIMM et BRADLEY (128) pour une meilleure détermination des minéraux argileux. En

effet, les plans réticulaires 001, 002, 003, etc., qui sont parallèles au clivage des phyllites ne sont plus disposés dans toutes les directions de l'espace comme dans une poudre ordinaire mais sont parallèles au plan de la plaquette sédimentée. Les réflexions correspondant à ces plans réticulaires ne donnent plus des cercles comme dans un spectre de bâtonnet, mais des petites accolades sur l'équateur du spectre. L'intensité des réflexions au lieu d'être répartie sur le cercle, est localisée sur ces accolades qui sont d'autant plus nettes. Quand on sait, comme on l'a vu plus haut, que la caractéristique principale des minéraux argileux est l'équidistance des plans parallèles aux feuilletés, on voit qu'on tient par les spectres de plaquettes orientées un procédé très précieux de diagnose des minéraux argileux, surtout quand ils sont mélangés.

NAGELSCHMIDT (303) a décrit sa méthode expérimentale. Celle qui est utilisée ici n'en est pas éloignée. Une suspension d'argile est mise à sécher dans un récipient à fond plat sur une plaque chauffante (50°) ou mieux, pour éviter les courants de convection, dans un dessiccateur à vide, les concentrations varient avec les minéraux autour de 1 % d'argile sèche. RIVIERE (331) a insisté sur la nécessité d'utiliser une suspension bien dispersée et bien défloculée pour avoir une bonne orientation. La plaquette est montée aux Rayons X verticalement, son plan faisant avec le faisceau incident un angle petit. On a choisi ici avec R. MICHAUD (284) la méthode de la plaquette oscillante, le plan de celle-ci oscillant de 4° de part et d'autre du faisceau incident.

C) Influence de la finesse des particules.

Recherchant dans les mélanges de minéraux argileux ceux qui s'y trouvent dans une faible proportion, l'obtention de diagrammes nets était utile. Il m'a semblé que la taille des particules influait sur la netteté des résultats. Pour étudier ce point, j'ai fait plusieurs plaquettes de tailles de plus en plus fines et les spectres furent réalisés. Les temps de sédimentation varient de 8 h. à 96 heures et correspondent à des particules comprises entre 2μ et $0,5\mu$. Je me suis alors aperçu que les résultats étaient moins bons au fur et à mesure que la finesse augmentait. Ceci peut être dû à deux raisons : 1^{re} Une raison physique : les raies s'élargissent quand les particules dépassent un certain degré de finesse, par le même phénomène que celui qui se passe quand on réduit par trop le nombre total des raies d'un réseau ligné. Mais cet argument ne semble pas applicable aux tailles supérieures à $0,5\mu$ puisque de nombreux auteurs ont des résultats très satisfaisants pour $0,2\mu$ (183).

2^{re} Une raison chimique peut être plus valable : en effet, les minéraux sont plus vulnérables aux traitements qu'on leur fait subir.

quand ils sont plus fins (THIEBAUT 362). En particulier, BARSHAD (9) a montré que la transformation de Biotite en Vermiculite par lessivage était plus rapide pour les petites tailles inférieures à 1 μ . Or, les échantillons étudiés dans ce travail ont souvent été dispersés dans l'ammoniaque à pH 9. Malgré la faiblesse de concentration d'une telle solution, il est possible que les particules très fines du minéral à 14 Å soient transformées par ce traitement. En effet, il est probable que le mélange contient souvent un minéral du groupe Hydrobiotite-Vermiculite et l'espacement de base de la Vermiculite à NH_4^+ est de 11 Å environ. De plus, à chaque fois que le matériau même fin a été convenablement traité en milieu calcique ou magnésien, la raie à 14 Å a réapparu.

La conclusion de ces essais est que l'on s'est arrêté dans la majorité des cas pour préparer les échantillons à la taille de 1 ou 2 μ . Les avantages sont les suivants :

1° La manipulation est plus rapide et plus facile car une quantité suffisante de cette fraction est facile à préparer.

2° Les raies à 14 Å sont appréciables qualitativement sur la plaquette préparée à l'Ammoniaque N/10. Les plaquettes préparées à l'Ammoniaque sont plus rapides à obtenir et plus faciles à manipuler. L'essai après traitement calcique ou magnésien n'est fait qu'après, s'il y a lieu.

3° Un seul inconvénient pourrait être signalé, celui de la présence des raies du quartz qui subsiste encore souvent dans la fraction argileuse de 2 μ . Mais cet inconvénient se transforme en avantage car les raies du quartz forment un repère précieux pour des mesures, ce qui simplifie beaucoup les corrections dues à l'épaisseur de la plaquette (qui ne sont d'ailleurs pas simples) et aux déformations des films au séchage.

D) Minéraux argileux phylliteux et fibreux.

La méthode des plaquettes orientées ne donne pas avec tous les minéraux argileux des accolades telles que celles qui ont été décrites. Le groupe des palygorskites, attapulgites et sépiolites, donne des anneaux irrégulièrement intenses mais *fermés* même quand la préparation d'une plaque bien sédimentée a été réalisée.

Ceci a été mis en évidence par BRADLEY (35) qui a proposé une structure en chaîne analogue à celle que NAGELSCHMIDT (304) avait pressentie. Récemment le microscope électronique a permis de connaître l'habitus de l'attapulgite qui est fibreux (MARSHALL HUBERT, SHAW et CALDWELL, 1942 : 265. ENDELL, 1945 : 103).

L'essai figuré à la Planche III montre qu'il en est de même pour la Sépiolite.

Ceci veut dire que la forme des particules d'Attapulgite et de Sépiolite est celle d'aiguilles, ainsi qu'il est fréquent chez les minéraux à structure en chaîne. L'habitus fibreux d'un minéral n'est cependant aucunement lié à une structure en chaîne. Le cas du Chrysotile est l'un des plus typiques. Des minéraux de structures les plus diverses peuvent donner des faciès bacillaires (214). L'Attapulgite et la Sépiolite réunissent la fibrosité du faciès et le développement de la structure en chaîne. Mais c'est la forme des particules qui dirige l'allure du spectre en anneau des minéraux de ce groupe. En effet, quand la sédimentation se produit, les aiguilles se couchent mais aucune orientation privilégiée ne leur est communiquée de ce fait puisqu'elles ne sont pas plates et le spectre reste un spectre de poudre.

RIVIERE a insisté (331) sur l'intérêt de cet aspect des spectres de plaquettes pour distinguer facilement les minéraux argileux fibreux de ceux qui sont phylliteux. Parmi les minéraux argileux fibreux et phylliteux des deux groupes, il en est qui furent autrefois confondus parce que la distance des plans de grande densité réticulaire était pour les deux assez voisine : il s'agit de l'illite et de l'Attapulgite. Le premier est phylliteux et caractérisé par l'équidistance à 10 Å, le second a un habitus fibreux, une structure fibreuse et une caractéristique de 10,5. Si ces deux minéraux se trouvaient mélangés, une certaine difficulté surviendrait, surtout dans les sols où les minéraux argileux mal cristallisés ne se reconnaissent guère qu'à leur équidistance de base. MICHAUD (285-286) a proposé la méthode de la croûte horizontale : les accolades dues à l'illite ne sont plus sur l'équateur mais au pôle du diagramme et s'il y a de l'Attapulgite dans le mélange, elle est seule à donner une raie aux environs de 10 Å sur l'équateur du diagramme. 5 % d'Attapulgite dans de l'illite sont déterminables par cette méthode. Plus difficile est l'appréciation d'une petite fraction d'illite dans l'Attapulgite, ainsi que je le décrirai par la suite.

2° RÉSULTATS POUR LES DIFFÉRENTS MINÉRAUX ARGILEUX.

Les tableaux 4 et 5 donnent la valeur des principaux écarts réticulaires, des minéraux argileux et des autres minéraux fréquents dans les roches étudiées dans ce travail. Les écarts qui bénéficient d'une notation 001, 002, 003, etc., sont ceux qui sont vigoureusement soulignés dans les spectres de plaques orientées par sédimentation. Les lignes principales qui sont continuellement utilisées dans ce travail sont :

Kaolinite		7		3,57
Montmorillonite	14-15		5,1	3,1
	(variable)			
Illite	10		5	3,33
Chlorite	14	7	4,70	3,53
Vermiculite	14			3,5
Attapulgite	10,5	6,4	5,4	4,48
Sépiolite	12,15	7,6	5,05	4,5

Les lignes suivantes, dans un mélange un peu compliqué, interfèrent facilement et sont difficiles à interpréter correctement.

TABLEAU N° 4

Equidistances réticulaires de quelques minéraux

Kaolinite	Méta-Halloysite	Illite	Montmorillonite	Montmorillonite glycérolée	Chlorite	Vermiculite
				17,7 +		
			15 +		14 +	14 +
		10 +				
7,1 +	7,4 +		7,18	3,85 +	7,04 +	
		5 +	5,1 +	5,85 +	5,25	
4,46	4,43	4,46	4,5	4,48 +	4,66 +	4,43
4,16			4,3			
3,58 +	3,7			3,55 +	3,51 +	3,55 +
3,36		3,34 +	3,34			
			3,05 +		3,13	3,1
		2,97		2,95		
		2,80			2,83 +	2,85
2,57	2,6	2,55 +	2,55 +		2,58 +	2,63
2,50		2,44		2,53	2,54	
2,36 +	2,3	2,37			2,43	2,38
2,28		2,23			2,25	
		2,17				2,19
		2,14				
		1,98 +			2,02	2,07
2,00						

3° INFLUENCE DU DEGRÉ D'HYDRATATION SUR LES DONNÉES DES RAYONS X.

A) Le degré d'hydratation lui-même.

Le degré d'hydratation de la Montmorillonite influe sur son espacement basal. HOFMANN et ses collaborateurs dès 1935 (184) ont montré ce phénomène. NAGELSCHMIDT en 1936 (298) a mesuré la diminution progressive de cet espacement en fonction de la perte d'eau. Cet espacement basal varie entre 10 et 20 Å environ. La Montmorillonite desséchée à 200° ne donne plus qu'un espace basal de 10 Å qui se confond avec celui des micas. De plus, la réhydratation de la Montmorillonite est rapide après une dessiccation ménagée. Ce phénomène empêche de faire voyager les plaquettes après

TABLEAU N° 5

Equidistances réticulaires de quelques minéraux

Attapulgite	Sépiolite	Quartz	Calcite	Dolomite	Hydrargillite	Coesthite
10,5 +	12,15					
6,44	7,6					
5,42	5,05				4,9 +	4,95
4,48 +	4,5				4,35	
		4,26 +				4,16 +
3,68	3,82		3,86	4,00		
3,45	3,60	3,35 +		3,81	3,33	3,33
3,24 +	3,22		3,04 +	3,18	3,22	
				2,85 +		
2,62	2,61			2,65		2,68
2,54	2,45	2,45	2,49	2,53	2,46 +	2,45
				2,39	2,39 +	
2,28	2,28	2,28	2,28 +		2,25	2,25
2,15 +		2,13		2,18 +	2,18	2,19
	2,09		2,09 +	2,00 +	2,05	
1,82		1,82 +	1,92 +	1,78 +	2,00	

déshydratation car elles se réhydratent rapidement. Il nécessite l'emploi de chambres à rayons X étanches où l'on peut faire régner les conditions hygrométriques que l'on désire. Le spectre d'une Montmorillonite peut être fait dans l'eau où un gonflement de l'espace basal se produit, ce qui est un phénomène caractéristique de ce minéral. Cette méthode a parfois servi de test dans ce travail grâce à l'obligeance de M^{me} CAILLÈRE et de M. HENIN.

B) Influence des cations échangeables.

Très vite on s'aperçut que la nature des cations échangeables modifiait également l'écartement basal de la Montmorillonite en modifiant son degré d'hydratation. De très nombreux travaux ont été faits. L'un des plus récents, celui de MEHRING (280) permet de distinguer l'eau d'absorption de l'eau d'hydratation. Il montre que l'hydratation de la Montmorillonite de Ca se produit successivement

a) par la formation de $\text{Ca}(\text{H}_2\text{O})_6$ avec espacement basal de 14 Å environ

b) par le comblement de l'espace restant et élévation de l'écartement à 15,5 Å correspondant à deux couches complètes d'eau orientée;

c) par la formation d'une troisième puis d'une quatrième couche moléculaire complète donnant 18,4 et 21,4 Å.

Au contraire, l'hydratation de la Montmorillonite de Na se fait d'une manière continue difficile à étudier. On observe souvent l'écartement de 12,5 Å qui correspond à une couche d'eau.

C) Effet du milieu de séchage.

Les travaux de ALDRICH JACKSON et HELLMANN (183 et 31) ont montré la grande influence du milieu de séchage. Une Montmorillonite de Ca séchée en milieu aqueux a donné un espacement basal de 10 Å. Le séchage dans l'alcool méthylique, le tétrachlorure de carbone et le toluène a donné des raies diffuses. Par contre, le benzène donne des raies fortes de l'ordre de 14 à 15 Å. Poursuivant leurs recherches, les auteurs américains ont montré que traitées au calcium et séchées au benzène, les Montmorillonites se caractérisaient par un espacement basal voisin de 14 et 15 Å. Au contraire, l'illite ou mica hydraté reste généralement constant à 10 avec parfois apparition d'une raie à 12 Å.

L'ensemble de ces travaux nous a amené à pratiquer fréquemment la méthode de saturation au Ca suivie de séchage au benzène. En effet, les spectres faits sur la fraction argileuse aussitôt après la dispersion en milieu ammoniacal donnaient des raies à 14 Å faibles

mais nettes. Le traitement de JACKSON et HELLMANN les a intensifiés et en a facilité l'étude. Ce traitement est le suivant :

1° Préparation de la fraction argileuse fine par la méthode décrite plus haut;

2° Ebullition dans acétate de Na 0,3 N au pH 3,5;

3° Traitement au $\text{Cl}^2\text{Ca}/\text{N}$. Centrifuger. Laver. 1 heure d'agitation mécanique. Centrifuger;

4° 3 lavages à l'eau avec agitation. Centrifuger;

5° Lavage à l'alcool éthylique avec agitation. Centrifuger;

6° 3 lavages à l'alcool méthylique avec agitation et centrifugation;

7° 1 lavage moitié alcool méthylique, moitié benzène. Agitation. Centrifugation;

8° 3 lavages au benzène. Agiter. Centrifuger.

L'ensemble de ces opérations fut poursuivi pendant plusieurs années quand fin 1948 le travail de BARSHAD sur l'échange de base chez les Vermiculites parut (9). On peut y lire que les Vermiculites voient leur espacement de base varier entre 10 et 15 suivant la base échangeable. Vermiculite-Ca : 15 Å, Vermiculite-Mg : 14 Å, Vermiculite-Ba et Li : 12 Å, Vermiculite- NH_4 : 11 Å, Vermiculite-K : 10 Å. On discutera plus loin la nature des mélanges rencontrés dans les roches sédimentaires argileuses. Un grand nombre de signes incitent à penser que la majorité de celles qui présentent une raie à 14 Å contiennent un minéral du groupe des Hydrobiotites-Vermiculites. Le traitement de JACKSON et HELLMANN semble s'appliquer à ces minéraux en permettant de souligner les raies à 14 Å indépendamment des conditions d'humidité où se trouve la plaquette après sa confection. C'est pourquoi cette méthode fut utilisée dans ce travail d'une manière fréquente.

4° INFLUENCE DU TRAITEMENT AU GLYCÉROL SUR LES DONNÉES AUX RAYONS X.

C'est parallèlement que des recherches ont été faites en Angleterre (MAC EWAN 251, 252, 254) et en Amérique (BRADLEY 36) sur les associations entre les minéraux argileux et les corps organiques. En particulier, le glycérol donne avec la Montmorillonite des associations non seulement très intéressantes, mais encore tout à fait précieuses pour la détermination des minéraux. La technique la plus simple consiste à imbiber une plaquette d'argile orientée avec du glycérol. La Montmorillonite apparaît sur le diagramme aux rayons X de la manière suivante :

1° Réflexion de base 001 à 17,7 Å;

2° Les harmoniques (tableau 4, page 96) n'interfèrent pas avec les raies des autres minéraux argileux. En particulier la raie 002 à 8,85 Å n'interfère pas avec les raies à 10 Å environ des minéraux construits sur le type mica et à 7 Å environ des kaolinites et des chlorites (252).

Les avantages sont nombreux (252, 251) :

1. Grande sensibilité. MAC EWAN peut déceler 1 % dans un mélange.
2. Distinction immédiate de la Montmorillonite vis-à-vis des Vermiculites et Chlorites à 14 Å qui ne gonflent pas avec le glycérol.
3. Insensibilité vis-à-vis du degré d'hydratation.
4. Distinction immédiate de la Montmorillonite vis-à-vis de l'Illite.
5. Enfin, étude facilitée des mélanges Montmorillonite-Illite. C'est ainsi que BRADLEY montra que la Bravaisite est un mélange (36).

Cette méthode fut utilisée comme test dans l'étude des mélanges de minéraux à 14,10 et 7 Å si fréquents dans les roches sédimentaires.

5° INFLUENCE DU CHAUFFAGE SUR LES DONNÉES DES RAYONS X.

L'analyse thermique différentielle et la déshydratométrie montrent qu'à certaines températures les minéraux perdent leur eau. Tant qu'il s'agit d'eau d'adsorption, le réseau et le spectre de Rayons X ne sont pas changés. A des températures supérieures, l'eau d'hydratation disposée entre les couches est éliminée et l'espace basal restreint. En chauffant encore plus les minéraux argileux, on parvient à évacuer l'eau de constitution correspondant aux OH qui font partie de la structure et le réseau est démoli. Le spectre est alors profondément modifié.

Ces différentes transformations se produisent à des températures variables avec les minéraux argileux et peuvent servir de test.

1° Le réseau de la Kaolinite est détruit à 530°.

2° L'espace basal de la Montmorillonite s'écroule avec sa déshydratation. Chauffée à 200° la Montmorillonite révèle un espace basal un peu inférieur mais voisin de 10 Å. Si la Montmorillonite a été traitée au Ca et séchée au benzène, l'affaissement de l'espace basal de 14 à 10 Å ne se produit qu'à 415° (183).

3° L'Illite est stable au delà de 750°.

4° Les Vermiculites perdent leur eau progressivement mais si l'on n'atteint pas 750°, la réhydratation peut être assez rapide. A

750° l'espacement basal est affaissé à 10 Å environ. Si l'on chauffe seulement à 450° ou à 250°, on a suivant la nature de la base échangeable 12 ou 10 Å environ (BARSHAD 9).

5° Les chlorites sont stables au delà de 530°. Cependant il arrive souvent que les raies d'ordre élevé dans les chlorites soient affaiblies par le traitement par la chaleur. Par contre, la raie de base à 14 Å persiste par chauffage à 500° et bien souvent s'intensifie.

6° APPLICATION DE CES MÉTHODES A LA DÉTERMINATION DES MÉLANGES DE MINÉRAUX ARGILEUX EXTRAITS DES ROCHES SÉDIMENTAIRES.

Tous les critères décrits ci-dessus furent utilisés pour caractériser les mélanges de minéraux argileux extraits des roches sédimentaires étudiées dans ce travail. L'exposé de la manière dont les identifications furent faites, sera fait en plusieurs points, en utilisant des exemples.

A) Exemple de la Marne de Jeandelaincourt.

L'échantillon sur lequel le maximum de tests ont été accumulés est celui de la Marne de Jeandelaincourt (Charmouthien, Meurthe-et-Moselle). 18 spectres ont été faits et sont décrits l'un après l'autre :

1° Ce spectre a été exécuté sur une plaquette obtenue par sédimentation de la fraction *fine* extraite de la roche *sans aucun traitement*. En dehors des raies du quartz et de la calcite d'ailleurs faibles, la distance des lignes de diffraction a été mesurée et correspond aux écarts réticulaires suivants exprimés en Å : 14,1 — 10 ÅF — 7,1 F — 5 — 3,58 — 3,33 F.

2, 3 et 4° Ces spectres ont été faits avec deux montages différents sur des plaquettes sédimentées à partir de suspensions dispersées à l'ammoniaque. Le premier montre les raies à 14 — 10 — 7 — 5 — 4,27 — 3,58 — et 3,33 avec un ordre d'intensité tel que la raie 7 Å semble deux fois plus intense que la raie à 10 Å. Les deux autres, très nets, donnent la série de raies suivantes : 14,2 — 12 floue — 10 ÅF — 7,2 F — 5 — 4,70 — 4,27 et circulaire — 3,59 F — 3,34 F et circulaire (pl. IV, 1).

La raie à 4,27 est celle du quartz ainsi que celle à 3,34 qui se superpose à la raie 003 du réseau micacé.

5° La plaquette a été faite de la même manière mais sur une fraction inférieure à 0,2 et après un traitement à l'ammoniaque prolongé. On voit une ombre entre 14 et 10 Å sans que les raies à 14 et à 12 Å soient visibles; l'ombre devient de plus en plus intense en se rapprochant de la raie à 10 Å. Celle-ci est plus intense que précédemment et devient presque aussi forte que la raie à 7. La raie à 3,35 est presque aussi forte que la raie à 3,59. Ceci montre une diminution de la netteté des raies à 14 Å par un traitement prolongé à l'ammoniaque sur une fraction très fine.

6° Le spectre a été fait sur une plaquette traitée à l'acétate de Na et au chlorure de Ca, puis séchée au benzène. Le résultat est le suivant : 15,07 F ombres entre 15 et 10 — 10 F — 7,2 TF — 5,05 — 4,50 F — 3,59 F — 3,33 F.

Le traitement au Ca fait monter la raie à 14 jusqu'à 15, ce qui a été obtenu par BARSHAD (9) sur les Vermiculites et ce qui est courant chez les Montmorillonites (pl. IV, 2).

7° Le même essai fait avec seulement 2 h. 1/2 de pose, au lieu de 3, donne un résultat analogue mais moins intense.

8° Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une phase argileuse traitée par l'acétate de Na, le chlorure de Ca mais *séchée dans l'eau*. Le résultat est le suivant : 15 m et floue — ombres entre 15 et 10 — 10 AF — 7,2 TF — 5 — 3,58 TF — 3,34 F —. Le résultat est moins net qu'avec le séchage dans le benzène.

9° Le spectre a été fait à partir d'une plaquette traitée au glycérol; ombres entre 14 et 10 — 10 AF — rien aux environs de 8 — 7,2 TF — 5 — 4,27 F — 3,58 TF — 3,34 F —. Le traitement au glycérol n'a pas fait apparaître de raies à 17 ni à 8,8 A° de la Montmorillonite glycérolée.

10° Le spectre a été fait sur un matériel et dans des conditions identiques aux précédentes sans traitement au glycérol; ce spectre témoin est le même que le précédent.

11° Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. La plaquette a été chauffée à 200°. L'ombre située entre 14 et 10 A° est ramassée vers la raie à 10 A°. Celle-ci a une intensité analogue à la raie à 7 A°. La raie à 14 subsiste affaiblie (pl. IV, 3).

12° L'échantillon a été préparé de la même manière mais chauffé à 520° pendant une heure. Les raies à 7 et 3,58 disparaissent. L'ombre comprise entre 14 et 10 est très atténuée alors que la raie à 10 A° devient très forte. La raie à 14 subsiste affaiblie.

13° Spectre de poudre à partir d'une suspension a) traitée à l'acétate de Na et au chlorure de Ca, b) séchée au benzène, c) chauffée à 500°. Le résultat donne les raies à 14 — 10 — 5 — 4,48 — et 3,34.

14° 15° et 16° Ces spectres correspondent à des essais faits au Muséum sur une poudre mise dans l'eau, mais les anneaux centraux sont flous et aucune diagnose n'est possible.

17° Ce spectre a été réalisé par M. MAC EWAN qui a eu la bonne obligeance de m'offrir de contrôler mes déterminations. Une plaquette orientée a été faite dans son laboratoire. Les écarts calculés sont les suivants : 14,25.m — 10.AF — 7,13.TF — 5,00.f — 4,70.lf — 3,56.F — 3,33.AF.

18° Une plaquette analogue a été chauffée à 500° pendant 3 heures. Le résultat est le suivant : 13,7.F — 10.F — 5.AF — 3,33.TF. Les raies à 7 et 3,56 ont disparu. Les raies à 10 — 5 et 3,33 ont gagné en intensité. La raie à 14,25 est passée à 13,7 en s'intensifiant légèrement. Cet essai est celui qui montre le plus nettement la résistance de la raie à 14 A° au traitement thermique (pl. IV, 4).

Les résultats de ces 18 spectres doivent permettre d'interpréter le mélange et de déterminer les minéraux argileux qui le constituent. L'argumentation peut se résumer comme suit :

1° Les raies à 10, 5 et 3,34 A° montrent la présence de l'illite.
2° La raie à 14 A° peut permettre d'hésiter entre Chlorite, Montmorillonite et Vermiculite.

3° On pouvait croire que la raie à 14 A° appartenait à un minéral du groupe de la Montmorillonite car elle est intensifiée par le traitement au calcium avec séchage au benzène et elle s'estompe

de plus en plus par chauffage à 200° puis à 500°. Cependant l'essai au glycérol ne montre ni le gonflement du réseau à 17,7 A°, ni l'apparition des raies à 8,85 A° et des harmoniques supérieures (5,85 et 2,95). On peut donc conclure qu'il ne s'agit pas de Montmorillonite.

4° La raie à 14 A° pouvait être interprétée comme appartenant à la Chlorite. On peut faire cette hypothèse en attribuant à la Chlorite la séquence 14, 7, 4,70 et 3,57 qu'on trouve dans les spectres.

On peut discuter cette diagnose de la manière suivante :

a) Les raies à 7 et 3,57 ne constituent pas un argument certain. En effet elles peuvent appartenir à la Kaolinite. Ceci est très plausible car elles sont beaucoup plus intenses que la raie à 14 et qu'elles disparaissent à 530°. Il est vrai que généralement les réflexions d'ordre supérieur à 14 A° disparaissent ou s'affaiblissent chez les chlorites par action de la chaleur. Il y a donc un doute. *En fait, ces raies à 7 et 3,57 appartiennent bien à la kaolinite mais ceci est prouvé par l'analyse thermique qui montre les crochets caractéristiques de cette espèce avec une grande netteté et en prouve l'abondance* (voir page 112). Ces raies peuvent évidemment recouvrir les mêmes raies de la chlorite.

b) La raie à 4,70, parfaitement nette sur les diagrammes où la raie à 14 est bien visible, constitue un argument encore douteux mais plus positif. Voyons les possibilités. 1° On rencontre une raie à 4,80 chez certaines montmorillonites. 2° La raie à 4,70 est typique chez les chlorites. 3° CAILLERE et HENIN (57 bis) ont obtenu une raie à 4,76 d'intensité moyenne dans leur montmorillonite traitée artificiellement et transformée en un minéral voisin de la chlorite. 4° L'hydrargilite possède un espacement basal de 4,9 A°. Comment choisir entre ces possibilités? La première doit être éliminée puisque la montmorillonite n'est pas prouvée. La seconde et la troisième me paraissent être les bonnes. La quatrième ne me paraît pas satisfaisante parce que les hydroxydes ont été éliminés par un traitement préalable et que la dispersion à l'ammoniaque à pH 9 est trop inoffensive pour libérer de l'alumine des argiles. De plus 4,9 est facile à distinguer de 4,7.

c) La raie à 14 A° doit donner la clé de la diagnose. En fait son interprétation est difficile par le fait qu'elle varie en passant à 15 A° par le traitement au Ca et le séchage au benzène. Cependant il reste un fait capital : cette raie subsiste au moins partiellement et parfois totalement au chauffage à 500° et *dans l'état actuel* de nos connaissances ceci caractérise la chlorite. Notons cependant que son écartement baisse (14,25 à 13,7), par le traitement thermique.

5° La raie à 14 Å° peut être interprétée comme appartenant au groupe des Hydrobiotite-Vermiculite. On peut discuter cette affirmation de la manière suivante :

a) Un traitement prolongé de la fraction fine à l'ammoniaque, même décinormale, atténue cette raie à 14 Å°. Des lignes floues à 11 Å° et 12 Å° apparaissent. Or BARSHAD (9) a montré qu'un traitement à l'ammoniaque amène l'édifice de la vermiculite à 11 Å°.

b) Le traitement prolongé de la fraction fine au chlorure de calcium a fait monter la raie à 14 Å° jusqu'à 15 Å° ce qui est conforme aux résultats de BARSHAD (9).

c) Le chauffage à 200° et surtout à 500° diminue beaucoup l'intensité des lignes ou des ombres floues entre 10 et 14 Å° et diminue également parfois l'intensité de la raie à 14 Å°. Pendant ce temps l'intensité de la raie à 10 Å° augmente très sensiblement. J'interprète ceci comme étant dû à des micas ouverts présents dans le mélange du type hydrobiotite-vermiculite qui s'écrasent sur 10 Å° par chauffage.

Conclusion : Je pense que la phase argileuse extraite de la Marne de Jeandelaincourt contient : 1° de la Kaolinite, 2° de l'illite, 3° un lot mixte Hydrobiotite-Vermiculite et Chlorite. En effet il existe des arguments pour la présence de la Chlorite (résistance de la raie à 14 Å° à l'action de la chaleur et présence de la raie à 4,70). Il existe aussi des arguments en faveur de la présence des Hydrobiotites-Vermiculites (disparition du flou et des lignes entre 10 et 14 par l'action de la chaleur, avec intensification de la raie à 10, fréquence des lignes à 11, 12 et 13 Å°).

Il est bon de souligner qu'au laboratoire — BARSHAD (9), CAILLERE et HENIN (51-55-57-58) — on a pu réaliser des passages expérimentaux par des traitements simples entre Mica-Vermiculite-Montmorillonite et Chlorite. *Il n'y a donc pas de raison pour que dans la nature de tels passages ne soient pas possibles et que l'on ne découvre pas ici ou là des espèces aux caractères ambigus. Il faut les considérer comme des produits en évolution d'un type à l'autre.* Ce serait le cas d'un minéral trouvé dans une marne du Keuper anglais par MAC EWAN et STEPHENS. Ce minéral a les caractères d'une Chlorite mais, comme les Montmorillonites, il gonfle par le traitement au glycérol. On a là un exemple de ces types intermédiaires que l'examen des faits naturels aussi bien que des faits expérimentaux permet d'imaginer.

B) Les mélanges à 14, 10 et 7 Å°.

La phase argileuse extraite de la Marne de Jeandelaincourt montre un mélange de minéraux où l'on peut déceler par les

Rayons X les raies à 14, 10 et 7 Å°. La coexistence de ces trois équidistances est extrêmement fréquente dans les roches sédimentaires. Cette association a été trouvée certaine dans 40 roches sur les 60 échantillons étudiés; les intensités relatives des raies varient énormément. Les critères destinés à préciser les minéraux que ces écarts réticulaires représentent ont été faits à plusieurs reprises, ainsi que l'exposé des faits le relatera fidèlement. Dans l'ensemble on arrive toujours à la même conclusion : on a affaire à un mélange 1° de Kaolinite, 2° d'illite, 3° d'Hydrobiotite-Vermiculite.

A ce propos, deux remarques sont nécessaires :

a) La ligne à 14 Å° n'est *très bien visible* que pour une quinzaine d'échantillons. Pour d'autres, il y a une ombre entre 14 et 10 Å° avec une limite brusque à 14 Å° sans qu'on puisse déceler une ligne véritable correspondant à cette équidistance réticulaire. J'attribue ce phénomène de diffraction à une structure d'Hydrobiotite où Vermiculite et Chlorite sont peu abondantes. De plus parfois des lignes à 13, 12 et 11 Å° plus ou moins nettes et plus ou moins floues sont visibles. Je continue à l'attribuer à l'Hydrobiotite, certains gonflements des empilements de couches étant réalisés de préférence. Enfin parfois on a seulement une ombre décroissante depuis 10 Å° jusque dans la région de 14 Å° mais il n'y a plus de ligne ni limite visible. Ici on peut dire seulement que l'on a affaire à des micas ouverts et hydratés sans qu'aucune périodicité ne puisse être enregistrée par la diffraction aux Rayons X.

b) Il a été depuis longtemps remarqué que pour l'illite, la ligne de diffraction équivalente à 10 Å° était floue vers le centre du spectre. Ceci est interprété comme la conséquence d'un certain écartement de l'empilement des feuillets micacés de l'illite, sous l'influence par exemple des molécules d'eau qui se sont glissées entre ceux-ci. Il faut donc tenir compte, dans les mélanges étudiés, pour interpréter l'ombre intérieure à 10 Å° à la fois de l'hydratation de l'illite et de l'hydratation des Hydrobiotites. Les deux phénomènes se superposent à partir de la même base à 10 Å°. On doit connaître cette concurrence. On ne peut en répartir les effets. Il y a même lieu de songer qu'illite et Hydrobiotite sont elles-mêmes en structure mixte et non pas en phyllites distinctes, mais il n'existe pas de moyen de la vérifier.

C) Exemple de la marne de Bainville-aux-Miroirs.

La phase argileuse extraite de Bainville-aux-Miroirs révèle sur les plaquettes traitées à l'ammoniaque à côté d'une raie à 10 Å°, une raie à 15 Å° qui ne change pas par traitement au benzène. Après traitement au glycérol cette raie accuse un notable déplacement vers le centre. On ne peut le chiffrer exactement car cette raie supérieure

à 15 Å n'est visible que d'un côté du spectre. On est donc orienté vers la détermination d'une Montmorillonite. On verra également, à propos de l'étude de cet échantillon, comment la chaleur agit sur la raie à 15 Å et confirme la diagnose de Montmorillonite.

D) Conclusion.

En définitive, après des mois de travail expérimental sur ces déterminations il semble que la majorité des lignes à 14 Å correspondent à un mélange d'Hydrobiotite-Vermiculite et de Chlorite. Ce dernier minéral étant plus ou moins abondant et plus ou moins manifeste. Cependant on peut rencontrer la Montmorillonite et l'on voit qu'il existe là un problème non pas statique mais dynamique. En effet il est probable que nous ne saisissons dans ces mélanges que des étapes dans la transformation d'un type à l'autre et l'on reviendra sur ce sujet.

Cependant il est nécessaire pour se faire comprendre de désigner les faits observés par des mots. Le vocable que j'utiliserai pour désigner les édifices 10-14 Å que j'ai rencontré sera celui d'Hydrobiotite. La Montmorillonite sera nommée quand elle se caractérisera bien par la méthode au glycérol. Quand la Chlorite sera évidente je dirai Hydrobiotite-Chlorite, ce qui équivaut au mélange Biotite-Vermiculite-Chlorite. *Il est possible que ces mots soient trop précis pour enfermer une réalité sans doute en pleine évolution mais ces termes figés sont les seuls dont je dispose et j'insiste pour qu'un sens large leur soit donné.*

On verra d'ailleurs par la suite que, quel que soit le mot qui est choisi pour désigner ce complexe minéral qui se manifeste par une ligne à 14 Å environ, la compréhension de sa genèse et son comportement géochimique sont identiques.

7° ÉVALUATION QUANTITATIVE DE LA PROPORTION DES MINÉRAUX MÉLANGÉS.

On peut évaluer d'une manière approximative la proportion de minéraux argileux contenus dans un mélange. Pour cela il suffit de comparer les intensités des lignes de diffraction de chacun des constituants en se repérant à des spectres de mélanges synthétiques. J'ai utilisé cette méthode qui mérite les commentaires suivants :

1° Dans l'état de nos recherches j'ai refusé de donner des proportions d'une précision supérieure à 10 %, ce qui n'aurait présenté aucune garantie.

2° La présence de minéraux micacés Illite, Hydrobiotite ou Chlorite dont l'écartement variait entre 10 et 14 Å rendait impossible toute comparaison avec la Kaolinite dont l'écartement est fixe aux environs de 7,1 Å. L'intensité des lignes de diffraction dues à des minéraux micacés est répartie dans l'ombre entre 10 et 14 Å et c'est la somme de toutes ces intensités qui doit être comparée à celle de la Kaolinite.

3° Si des mélanges synthétiques d'Illite et de Kaolinite étaient possibles à faire, des mélanges contenant de l'Hydrobiotite étaient plus difficiles. On ne savait quelle Hydrobiotite choisir ni après quel traitement l'introduire dans le mélange.

4° C'est pourquoi j'ai cherché à ramener le mélange Hydrobiotite-(Vermiculite), Chlorite-Illite-Kaolinite à un mélange plus simple. Mica-Kaolinite-Chlorite. Ceci peut être réalisé par chauffage. En chauffant, l'eau des micas hydratés est chassée progressivement et l'empilement gonflé des Hydrobiotites, Vermiculites, Montmorillonites et même Illites hydratées s'écrase sur 10 Å. En même temps, la raie à 10 Å s'intensifie. Il a donc fallu comparer l'intensité de la raie à 10 Å après chauffage à la raie à 7,1 Å de la Kaolinite sans chauffage puisque celui-ci la détruit. Toutes ces comparaisons ont abouti à une méthode d'évaluation des pourcentages qui a rendu les meilleurs services. Des perfectionnements considérables pourraient être apportés à ces mesures subjectives par l'enregistrement photoélectrique des intensités. Néanmoins un résultat convenable a été obtenu.

5° Pour le mélange Mica-Kaolinite la comparaison des raies à 3,57 Å (Kaolinite) et 3,34 (réseau micacé) a permis des confirmations très utiles en plus des comparaisons d'intensité des raies de base. Il fallait tenir compte de la présence de la raie 3,57 possible des Chlorites.

IV. - L'analyse thermique différentielle

L'analyse thermique différentielle est une méthode précieuse pour l'étude des minéraux argileux. A partir de la méthode d'analyse thermique directe de LE CHATELIER (227), la méthode fut rendue différentielle par WALLACH (386). Elle fut appliquée aux chlorites par ORCEL (318), aux minéraux des serpentines et des palygorskites par M^{lle} CAILLERE (47 bis) et aux minéraux des argiles par ORCEL et S. CAILLERE (319, 320). L'intérêt de cette méthode est multiple. D'abord elle précise les températures des différentes transformations que subit un minéral au cours de son échauffement et ceci a permis de préciser de nombreux problèmes de structure. Ensuite l'analyse thermique différentielle donne des courbes qui permettent de caractériser de nombreux minéraux (ORCEL 320; GRIMSHAW, HEATON et ROBERTS 154; GRIM et ROWLAND 150). Enfin, elle permet une étude qualitative et parfois quantitative des mélanges (ORCEL 320; GRIM 152).

L'emploi de cette méthode pour l'étude des fractions argileuses des roches sédimentaires s'est imposé. On pouvait redouter l'influence du traitement subi par la roche pour l'extraction de la phase argileuse. S. CAILLERE et HENIN (50) ont montré que certains traitements chimiques modifiaient l'allure des courbes. Cependant la méthode d'extraction décrite plus haut ne fait intervenir que des attaques ménagées et les caractéristiques les meilleures des minéraux ont pu être retrouvées.

D'autre part, la méthode appliquée sans cesse de la même manière devait donner des résultats fidèles et comparables. L'interprétation des courbes fut faite sous la direction de M^{lle} S. CAILLERE et se révéla complémentaire des indications des Rayons X.

1° PRINCIPE ET APPAREILLAGE.

Les courbes d'analyse thermique différentielle furent faites avec l'appareillage du Laboratoire de Minéralogie du Muséum d'Histoire Naturelle de Paris, grâce à l'obligeance de M. ORCEL et de M^{lle} CAILLERE. Je rappellerai seulement le principe de la méthode. La manipulation a pour but d'enregistrer les températures auxquelles des transformations se produisent dans un minéral quand on l'échauffe. Le dispositif permet de plus de savoir si la transformation s'est faite avec absorption ou dégagement de chaleur.

Pour ce faire, deux échantillons sont portés ensemble de 0 à 1.100° en 1 h. 30, selon une loi d'échauffement linéaire. Le premier échantillon sert d'étalon et reste inerte au cours de la manipulation. Le second est la substance à étudier; celle-ci est le siège, au cours du chauffage, de transformations endo ou exothermiques qu'il faut déceler. La soudure d'un couple thermoélectrique est plongée dans la substance inerte. Elle fait varier, par l'intermédiaire d'un galvanomètre, un spot lumineux dans le plan horizontal en fonction de l'accroissement de la température. Un couple différentiel est formé de deux autres couples montés en opposition. Ses soudures plongeant chacune dans un des deux échantillons font varier par un autre galvanomètre le même spot lumineux dans le plan vertical en fonction de l'écart des températures entre substance étudiée et substance étalon. Le dispositif de LE CHATELIER et SALADIN (229) utilisant un prisme en position de Lissajoux, fait que les deux galvanomètres agissent sur le même spot. Le résultat est le suivant :

1° La plaque photographique après enregistrement et développement donne une seule courbe;

2° Si la substance à étudier est inerte, la courbe enregistrée est horizontale;

3° Pour une substance qui est le siège de transformations en cours de chauffage, la courbe montre sur son trajet des crochets vers le bas qui correspondent à des transformations endothermiques et des crochets exothermiques vers le haut;

4° Les départs d'eau sont endothermiques;

5° J. ORCEL a montré (318) que les températures de transformations indiquées par l'analyse thermique sont trop fortes de 100° par rapport aux températures indiquées par déshydratation sous vide. Il y a là une erreur systématique qui ne gêne pas les diagnoses.

2° COURBES OBTENUES A PARTIR DE PHASES ARGILEUSES A DOMINANTE KAOLINIQUE.

Il s'agit des 4 premières courbes qui sont représentées à la figure 7.

COURBE I. — Kaolinine typique de St-Austell : crochet endothermique à 510°, crochet exothermique à 970°.

COURBE II. — Phase argileuse extraite d'une roche du Bassin de Provins (Les Pleux) : le crochet endothermique à 530° et le crochet exothermique à 910° caractérisent la Kaolinite. Le spectre de Rayons X ne révèle la présence de l'illite que pour une part faible (10 %); l'analyse thermique ne l'accuse pas.

COURBE III. — Phase argileuse extraite du Barrémien de Sommancourt : le crochet endothermique à 550° et le crochet exothermique atténué à 930° caractérise la Kaolinite. De plus, la courbe marque une amorce d'inflexion vers 480° et ceci fait supposer l'Illite.

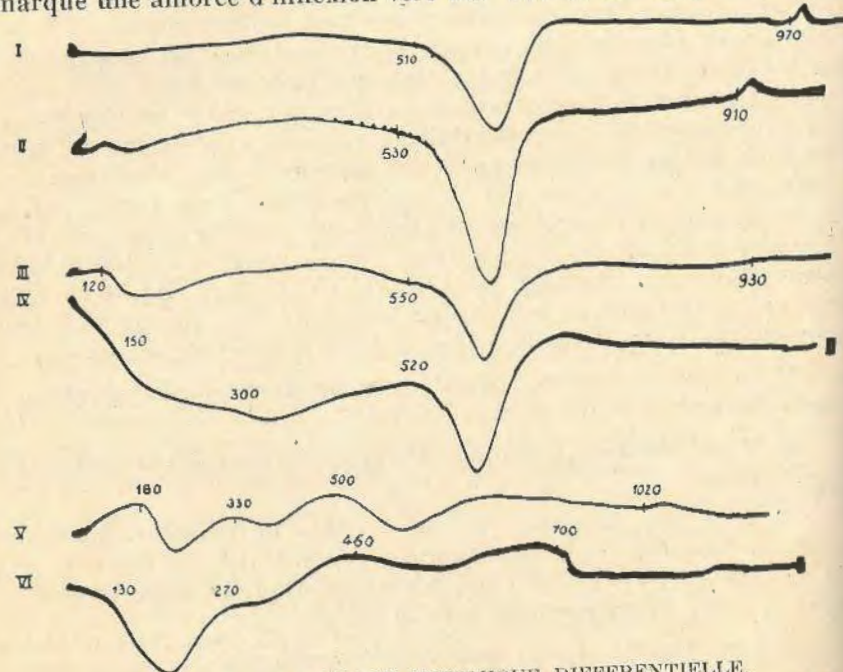


FIGURE 7. — ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE.
Roches kaoliniques : I. Kaolin de St-Austell, Cornouailles (G.-B.). — II. Les Pleux, Sparnacien (S.-et-M.) n° 52. — III. Sommancourt, Barrémien (Hte-Marne) n° 47. — IV. Westerwald (Allemagne) n° 54.
Attapulgites : V. Attapulgis, Géorgie (U.S.A.). — VI. Cormelles-en-Parisis, Ludien (S.-et-O.) n° 37.

Les Rayons X effectivement révèlent une proportion d'Illite qu'on peut évaluer à 20 %. Ici on remarque la difficulté des évaluations quantitatives qui est due à ce que le crochet endothermique à 530° de la Kaolinite est pour le minéral pur beaucoup plus intense que son correspondant à 480° de l'Illite pure. Aussi ce dernier est plus ou moins masqué.

COURBE IV. — Phase argileuse extraite d'une terre réfractaire du Westerwald (Allemagne). Le crochet endothermique à 520° est net et bien que le crochet exothermique supérieur à 900° soit amorti, il caractérise la Kaolinite. On peut noter sur la courbe un accident sur le flanc du crochet endothermique de la Kaolinite qui peut confirmer la présence d'Illite révélée aux Rayons X (30 % environ) mais on ne peut l'affirmer.

3° COURBES OBTENUES A PARTIR DE PHASES ARGILEUSES FORMÉES D'ILLITE.

La courbe des Illites n'est pas extrêmement fidèle. La caractéristique principale est un crochet entre 480° et 600° qui peut se dédoubler. Le premier crochet endothermique de l'Illite s'amorce-rait plus tôt que celui de la Kaolinite. Un phénomène exothermique se produit souvent entre 800° et 1000° plus ou moins nettement. Cinq courbes d'analyse thermique faites sur des argiles dont le spectre de Rayons X donne l'Illite, sont présentées à la figure 8.

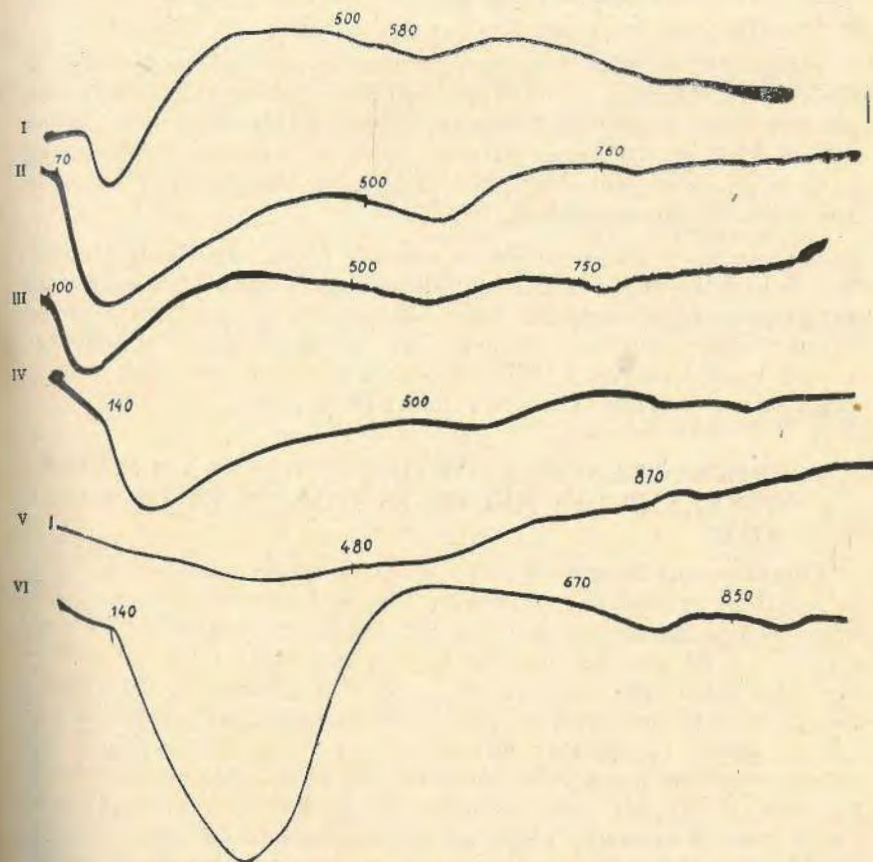


FIGURE 8. — ANALYSE THERMIQUE DIFFERENTIELLE.
Roches illitiques : I. Illite type. Coll. Mus. Hist. Nat. Paris (n° 2.498). — II. Illite de Pennsylvanian Underclay, Vermilion County, Illinois (U.S.A.). — III. — Damelevières, Lettenkohle (M.-et-M.) n° 30. — IV. Bainville-aux-Miroirs, Keuper (M.-et-M.) n° 31. — V. Housseras, Anhydritgruppe (Vosges) n° 27. — VI. Montmorillonite autrichienne : Coll. Mus. Hist. Nat. Paris (n° 2.766).

COURBE I. — Illite type de la Collection Muséum (Courbe n° 2.498). Le crochet endothermique dédoublé à 500° et à 580° caractérise l'Illite.

COURBE II. — Illite de Pennsylvanian underclay, Vermilion County (Collection W.-F. BRADLEY). Le crochet endothermique à partir de 480°-500° caractérise l'Illite.

COURBE III. — Phase argileuse extraite d'une marne de Damelevières. Lettenkohle. Muschelkalk Supérieur (M.-et-M.). Le crochet endothermique à 500° est bien visible. On remarque la grande similitude de cette courbe avec la précédente. Les Rayons X révèlent l'Illite pure.

COURBE IV. — Phase argileuse extraite d'une marne à gypse de Bainville-aux-Miroirs — Keuper inférieur (M.-et-M.). L'inflexion endothermique à 500° de l'Illite est déjà plus atténuée mais encore nette. A 770° et 870°, existent deux crochets difficiles à interpréter qui se rapportent peut-être à des carbonates épargnés par un lessivage volontairement modéré.

COURBE V. — Phase argileuse extraite d'une argilite de Housse-ras : Anhydritgruppe — Muschelkalk moyen (Vosges). Les variations sont atténuées au maximum pour cette courbe qui est peu démonstrative. Néanmoins, on remarque un infléchissement à 480°, un crochet exothermique à 870°. L'ensemble n'est pas opposé à la diagnose aux Rayons X qui révèlent l'Illite pure.

4° COURBES OBTENUES A PARTIR DE PHASES ARGILEUSES RÉVÉLANT DES MÉLANGES D'ILLITE ET DE KAOLINITE.

L'analyse aux Rayons X a révélé des mélanges de minéraux dans les fractions argileuses extraites des roches sédimentaires. En particulier de très nombreux spectres ont montré la coexistence de raies à 10 et à 7 Å° et assez souvent la coexistence de raies à 14, 10 et 7 Å°. La discussion de la raie à 14 Å° fut délicate et fut exposée plus haut; celle de la raie à 7 Å° est résolue par l'analyse thermique. Celle-ci permet d'affirmer que cette raie ne correspond pas aux réflexions sur les plans 002 d'un minéral à 14 Å° d'espacement basal. En effet, le crochet endothermique de la Kaolinite est nettement visible dans les courbes faites avec ces mélanges. De plus, il est de plus en plus vigoureux au fur et à mesure que l'intensité de la raie à 7 Å° augmente d'un échantillon à l'autre. Ces faits sont montrés par les cinq premières courbes qui sont présentées à la figure 9.

COURBE I. — Phase argileuse extraite d'une marne de Liffol-le-Grand — Callovien (Vosges). On peut évaluer la proportion de Kao-

linite par les Rayons X à 30 %. La double inflexion entre 480° et 600° est remarquable et caractérise l'Illite, la deuxième est accentuée par la Kaolinite, à moins qu'elle ne la provoque à elle seule. Etant donné que pour les minéraux purs les courbes thermiques révèlent que le crochet de la Kaolinite est beaucoup plus vigoureux que le crochet de l'Illite, on peut constater sur cette courbe I que l'Illite domine.

COURBE II. — Phase argileuse extraite d'une argile de décalcification ocre remplissant une diaclase dans le calcaire oolitique de Maxéville. Le raisonnement est identique. Le crochet dû à la Kaolinite est un peu plus net.

COURBE III. — Phase argileuse extraite d'une marne de Champigneulle — Toarcien (M.-et-M.). Les caractéristiques de la courbe sont : un méplat endothermique à 480°, un crochet endothermique à 530°. Ainsi on vérifie que la Kaolinite et l'Illite coexistent dans le mélange.

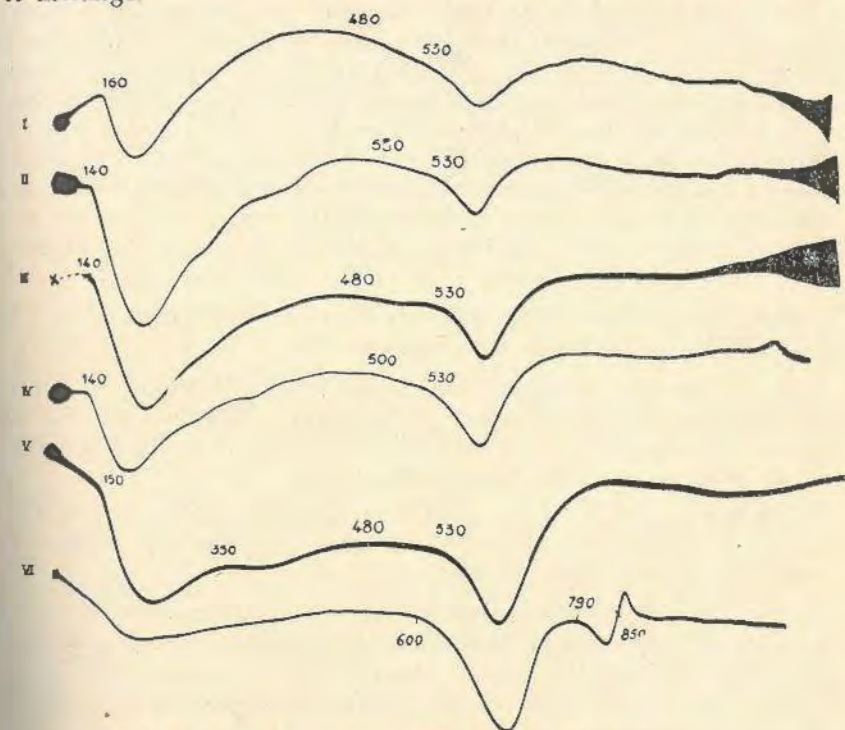


FIGURE 9. — ANALYSE THERMIQUE DIFFÉRENTIELLE.

Mélange d'Illite et de Kaolinite extrait de roches argileuses : I. Liffol-le-Grand, Callovien (Vosges) n° 14. — II. Argile de décalcification, Maxéville (M.-et-M.). — III. Champigneulle, Toarcien (M.-et-M.) n° 12. — IV. Ludres, Toarcien (M.-et-M.) n° 11. — V. Jeandelaincourt, Charmouthien (M.-et-M.) n° 8. — VI. Pennine de Zermatt. Coll. Mus. Hist. Nat. Paris (n° 2.179).

COURBE IV. — Phase argileuse extraite d'une marne de Ludres — Toarcien (M.-et-M.). Les caractéristiques sont analogues. Le pic exothermique de la Kaolinite est nettement visible et confirme la présence de ce minéral.

COURBE V. — Phase argileuse extraite d'une marne de Jeandelaincourt — Charmouthien (M.-et-M.). Le crochet de la Kaolinite est beaucoup plus vigoureux. L'illite visible aux Rayons X se révèle encore par le méplat qui précède ce crochet mais la Kaolinite domine.

La raie à 7 Å est manifestement due à la présence de la Kaolinite et ne correspond pas aux réflexions 002 d'un minéral à 14 Å. Cette conclusion est pour ce travail très importante.

5° LA QUESTION DES INFLEXIONS AUX ENVIRONS DE 300°.

A plusieurs reprises on peut remarquer sur les courbes d'analyse thermique des inflexions endothermiques vers 300°-350° (courbes II, III, IV et V de la figure 9). M^{me} CAILLÈRE a bien voulu me guider dans leur interprétation. Une première possibilité est de les attribuer à un hydrate tel que l'Hydrargillite ou la Goethite qui donnent vers ces températures des inflexions endothermiques. Ceci vient donner corps à une hypothèse que les Rayons X avaient permis d'envisager, qui est celle de la présence d'Hydrargillite rendant compte des raies à 4,70-4,80 Å qu'on rencontre dans les mélanges de minéraux à 14, 10 et 7 Å.

Mais on a vu que l'hypothèse de la présence d'Hydrargillite n'est pas certaine, et ceci pour deux raisons :

a) Parce que l'Hydrargillite naturelle, si elle existe, doit avoir été éliminée par le traitement acide et qu'il n'est pas du tout sûr que de l'ammoniaque à pH 9 libère de l'alumine à partir des argiles; ce phénomène est même improbable.

b) Parce que les raies à 4,7-4,8 Å peuvent appartenir à la Chlorite ou à un minéral chloritique tel que celui qui fut obtenu par CAILLÈRE et HENIN (57 bis).

Par ailleurs j'ai été amené à songer à la présence de structures voisines de celles des Hydrobiotites-Vermiculites. Des départs d'eau vers 300°-350° ont été souvent observés sur ce matériel (57 bis - 9). Il est donc possible que ces inflexions correspondent à la présence de ces minéraux.

6° GROUPE DE L'ATTAPULGITE.

Deux courbes sont présentées à la figure 7. La première (courbe

V) est celle de l'Attapulgitite d'Attapulgis; la seconde (courbe VI) celle du minéral extrait des marnes blanches à gypse de Corneilles-en-Parisis. Les inflexions endothermiques aux environs de 150°, 300° et 500° sont visibles sur la courbe de l'échantillon étudié et confirment la diagnose faite aux Rayons X. Le minéral appartient au groupe de l'Attapulgitite.

7° COURBES DE RÉFÉRENCE.

La courbe VI de la figure 8 est celle d'une Montmorillonite autrichienne typique. La courbe VI de la figure 9 est celle d'une Chlorite typique. Ces deux échantillons proviennent des collections du Muséum d'Histoire Naturelle (n° 2766 et 2179).

CONCLUSION.

Ainsi l'on voit de quelle manière l'analyse thermique vient confirmer les déterminations faites par d'autres méthodes comme l'analyse aux Rayons X. De plus, dans plusieurs cas, elle permet de lever une ambiguïté : c'est ce qui a été particulièrement précieux dans ce travail pour l'interprétation des raies à 7 Å en présence de la raie à 14 Å.

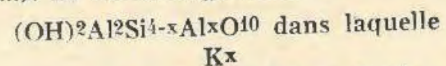
Les premières appartiennent sûrement à la Kaolinite.

V. - L'analyse chimique de la phase argileuse

L'analyse chimique fut autrefois le seul moyen dont on disposait pour saisir l'originalité des minéraux argileux les uns vis-à-vis des autres. Si les méthodes qui viennent d'être décrites sont plus capables de résoudre les mélanges, l'analyse chimique reste indispensable pour « connaître » véritablement les matériaux qu'on étudie. Une fois qu'on possède les résultats de l'analyse chimique, résultats obtenus par les méthodes classiques de l'analyse des silicates, l'interprétation des résultats n'est pas facile. Cette interprétation nécessite le concours d'autres techniques et les difficultés qu'elle présente nécessitent les commentaires suivants :

A) CALCUL DE LA FORMULE DES MINÉRAUX ARGILEUX A TROIS COUCHES.

Supposons l'analyse chimique faite sur un matériel pur et que les Rayons X aient révélé que le minéral argileux unique appartenait à un groupe formé d'une couche octaédrique prise entre deux couches tétraédriques (Montmorillonites en général. Illites. Glauconies. Micas, etc...). Le formule générale d'un tel édifice est :



- a) Al^{2+} peut être remplacé par Fe^{2+} ou Fe^{3+} ou Mg^{2+} ;
- b) x est plus petit que un;
- c) K peut être remplacé par Na , Ca ou Mg .

Dans cet édifice, se trouvent 10 oxygènes et 2 oxyhydriles, soit 22 valences négatives. Pour les saturer, les cations doivent correspondre à 22 valences positives. Le calcul de la formule sera conduit selon la méthode de HARVEY (1955), de la manière suivante :

1° Les poids de chacun des oxydes donnés par l'analyse chimique en % seront divisés par les poids moléculaires de ces oxydes. On obtient le nombre de molécules d'oxydes contenues dans 100 grammes.

2° On multiplie le nombre de molécules contenues dans 100 grammes par le coefficient que possèdent les cations dans chacune de leurs combinaisons avec l'oxygène. On obtient le nombre d'atomes de cations contenus dans 100 grammes.

3° On multiplie le nombre d'atomes de cations contenue dans 100 grammes par la valence de chaque cation. On obtient le nombre de valences électropositives de chaque cation contenues dans 100 grammes.

4° On fait la somme du nombre de valences de chaque cation et l'on trouve le nombre total de valences électropositives contenues dans 100 grammes.

TABLEAU N° 6

CALCUL DE LA FORMULE DE LA PHASE ARGILEUSE EXTRAITE DE L'ARGILITE DE HOUSSEBAS-VERT (illite seule).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nom des oxydes	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	FeO	MgO	CaO	K_2O	Na_2O					
%	54	20,3	5,25	1,90	3,05	0,85	6,20	2,00					
Poids Moléculaire	60	102	160	72	40	56	84	62					
Nbre Mol d'oxydes pour 100 g.	0,9000	0,2000	0,0328	0,0208	0,0762	0,0152	0,0737	0,0322					
Nbre Atomes pour 100 g.	0,9000	0,4000	0,0656	0,0208	0,0762	0,0151	0,1474	0,0644					
Val. du Cat.	4	3	3	2	2	2	1	1					
Nbre Valences + pour 100 g.	3,6000	1,2000	0,1968	0,0416	0,1524	0,0302	0,1474	0,0644					
Coeff. X = 22 / 5,4328	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05	4,05					
Nbre At. p. 100 g. Colonne 6	0,9000	0,4000	0,0656	0,0208	0,0762	0,0151	0,1474	0,0644					
Nbre At. de cations p. 22 val (K x Col 6)	3,64	1,62	0,26	0,08	0,31	0,06	0,59	0,26					
For- mule.	$\text{Si}_3,64$	$\text{Al}_1,62$	$\text{Fe}_0,26$	$\text{Fe}_0,08$	$\text{Mg}_0,31$	$\text{Ca}_0,06$	$\text{K}_0,59$	$\text{Na}_0,26$					
Nbre At. par couches	= 4			1,91				= 0,81					

RÉSULTAT : $(\text{OH})_2 (\text{Al}_{1,26} \text{Fe}^{2+}_{0,08} \text{Fe}^{3+}_{0,26} \text{Mg}_{0,31}) (\text{Si}_{3,64} - \text{Al}_{0,36})_2 \text{O}_{10}$
 (Ca $0,06$ - K $0,59$ - Na $0,26$)

5° On divise 22 par ce nombre de valences électropositives pour trouver le coefficient numérique k par lequel il faudra multiplier le nombre d'atomes contenus dans 100 grammes pour obtenir le nombre d'atomes nécessaires pour saturer 22 valences.

6° On multiplie le nombre d'atomes contenus dans 100 gr. par le coefficient k et on obtient le nombre d'atomes nécessaires pour saturer 22 valences.

7° On bâtit la formule d'après la formule théorique du réseau micacé. Tout le silicium est insuffisant pour fournir 4 atomes, on complète avec une partie de l'aluminium. Le reste de l'aluminium additionné au fer ferrique, au fer ferreux et au magnésium forme avec ces cations la couche octaédrique. Le total du nombre de ces atomes doit faire 2 pour la série dioctaédrique ou heptaphyllite et 3 pour la série trioctaédrique ou octophyllite. Enfin, les ions Mg restants et les ions Ca, K et Na forment les cations de la couche intermédiaire dont la somme est comprise entre 0 et 1.

Un exemple de cette méthode de calcul est donné au tableau n° 6. L'analyse chimique a été faite sur la phase argileuse extraite de l'Argillite verte de Housseras. Les Rayons X révèlent que cette phase argileuse n'est composée que d'un constituant à 10 Å attribué à l'Illite.

B) LE ROLE DES IMPURETÉS.

Il est un certain nombre de facteurs qui viennent compliquer l'interprétation de l'analyse chimique de la phase argileuse des roches. Parmi ces facteurs, la présence d'impuretés en est évidemment un des principaux. Les minéraux argileux peuvent retenir dans leur masse des minéraux étrangers qui, analysés avec la phase argileuse, faussent les résultats et le calcul des formules (KELLEY 193). Au premier rang de ces impuretés, vient le quartz. Cette silice dosée comme appartenant à l'argile, prend une part plus importante qu'il serait normal dans le calcul. La quantité de Si augmente aussitôt en position tétraédrique mais surtout la somme des cations en position octaédrique diminue. Ceci fait que la présence de silice comme impureté est beaucoup plus apparente par le fait que la somme des atomes en position octaédrique est inférieure à 2 (cas des minéraux dioctaédriques) que par le fait que la proportion de Si a augmenté au groupe tétraédrique. Il est probable que c'est le cas de l'échantillon du tableau 6 qui provient de Housseras, bien que le spectre des Rayons X fait sur un reste de la fraction argileuse livrée à l'analyse chimique, n'en montre plus la trace.

D'autres impuretés peuvent se trouver mêlées à la phase argileuse et en particulier Al_2O_3 et surtout Fe_2O_3 . L'effet de ces impuretés sur le calcul est inverse du précédent et le nombre des atomes en position octaédrique a tendance à dépasser 2. On voit tout de suite que si la phase argileuse est à la fois impure en SiO_2 et en Fe_2O_3 , les deux défauts peuvent se corriger, la somme des atomes en

position octaédrique peut être 2 et pourtant la formule obtenue peut être fausse.

On voit ici l'importance considérable d'une purification aussi complète que possible par les moyens chimiques et physiques de la phase argileuse qui doit être livrée à l'analyse chimique. Il est inutile de revenir sur la difficulté d'une telle purification. Il restera sans cesse une part d'imprécision qui est pour l'instant dans la nature des choses.

C) LE ROLE DES CATIONS DE LA COUCHE INTERMÉDIAIRE ET DES CATIONS ÉCHANGEABLES.

On peut remarquer que les cations Mg sont, dans le calcul ci-dessus, attribués automatiquement à la couche octaédrique. Ceci est arbitraire. En effet, l'existence de Mg dans la couche intermédiaire est certaine dans un grand nombre de matériaux et en particulier par définition dans les Vermiculites (9) ainsi qu'on l'a vu. Il serait donc indispensable de pouvoir répartir les ions Mg entre les positions octaédriques et intermédiaires. Quand ces ions Mg intermédiaires sont échangeables, on a une possibilité d'appréciation. Il y a là des difficultés théoriques importantes. Pratiquement, l'attribution du Mg à la couche octaédrique jusqu'à ce que celle-ci soit complétée à 2 ou à 3 est légitime, surtout quand on travaille sur une phase argileuse où l'on a réalisé l'élimination du Mg échangeable. D'autre part, pour la majorité des auteurs, il est impossible de compléter la couche octaédrique avec des ions Ca, Na ou K qui sont trop gros et qui préfèrent les liaisons octo ou dodécacoordonnées aux liaisons hexacoordonnées des octaèdres. L'utilisation au maximum du magnésium pour garnir la couche octaédrique est donc logique.

D) LE ROLE DES MÉLANGES.

Au fur et à mesure que les techniques analytiques se perfectionnent, les matériaux argileux se révèlent de plus en plus fréquemment être des mélanges de minéraux types. C'est le cas dans les roches sédimentaires où l'on peut dire, ainsi que l'exposé des faits le montrera, que la majorité des roches contiennent des mélanges dans leur phase argileuse. Par le mot « mélange », nous désignons volontiers les minéraux interstratifiés de NAGELSCHMIDT (306) et de GRUNER (156), les structures mixtes de BRADLEY (36) et les associations épitaxiales de J. DE LAPPARENT (206 bis). Le calcul d'une formule sur un mélange de minéraux ne signifie rien. Mais il est arrivé que des techniques encore peu perfectionnées fassent croire à des espèces pures et permettent de calculer des formules. C'est ce qui m'est arrivé il y a quelques années (289) quand des

spectres de poudre qui paraissent aujourd'hui imparfaits n'avaient révélé que l'illite dans la phase argileuse extraite des roches. Des formules ont été calculées à partir de l'analyse chimique qu'on croyait faite sur un minéral pur. Les raisonnements faits ensuite sont utilisables sur le fond mais sont incorrects par la forme puisqu'il s'agit en fait de mélanges. Le raisonnement s'applique au mélange et non à un minéral.

E) ÉTUDE CHIMIQUE DE QUELQUES MÉLANGES.

1° Le raisonnement utilisé pour les roches qui contiennent exclusivement de la Kaolinite est fort simple. On n'admet pas de remplacements isomorphiques dans le réseau de la Kaolinite. Toute la Silice et l'Alumine de la fraction fine exempte de quartz est attribuée à la Kaolinite. On considère que le Fer appartient à un sesquioxyde ou parfois qu'il est adsorbé. Les alcalins et alcalino-terreux sont considérés comme adsorbés.

2° En fait, un grand nombre de roches kaoliniques apparaissent aux Rayons X comme contenant un peu d'illite. Il est impossible à partir de l'analyse chimique d'attribuer à celle-ci tous les cations autres que le Si et l'Al. En effet, les cations adsorbés existent de toute façon et ils ne sont pas tous engagés dans des réseaux cristallins.

D'autre part, la formule de l'illite oscille entre des limites assez larges et même si on se débarrassait par un traitement convenable des cations adsorbés avant l'analyse chimique, il serait impossible de calculer la proportion d'illite dans le mélange. En effet, on pourrait supposer que la quantité d'illite contenue dans le mélange est proportionnelle à la quantité de Potassium. Mais la quantité de Potassium dans l'illite varie dans des limites qui bien qu'encore mal connues semblent comprises entre 0,5 et 0,8. Aucun raisonnement valable ne peut être fait sur des bases aussi variables.

3° Plus intéressant et plus légitime serait le calcul de la répartition des minéraux dans un mélange de types argileux exclusivement micacés, comme l'illite, la Montmorillonite, la Vermiculite-Hydrobiotite par exemple. D'après le nombre de cations qu'on serait obligé de placer en position octaédrique, on pourrait répartir les constituants entre la série octophyllite où ce nombre est 3 (trioctaédrique) et la série heptaphyllite où ce nombre est 2 (dioctaédrique).

Mais ce raisonnement doit être utilisé avec une grande prudence, étant données toutes les causes d'erreurs déjà énumérées, du fait des impuretés, en particulier du fait des sesquioxydes qui viennent eux aussi augmenter dans le calcul la proportion des ions octaédriques.

4° Il paraît plus judicieux d'étudier la composition chimique du mélange lui-même. Quand on se livrera à la comparaison des phases

TAB. LEAU N° 7
Résultat des Analyses chimiques de la phase argileuse extraite des roches sédimentaires

N°	2	3	4	5	7	8	10	12	15	16	17	19	20
Nom de la Roche	Healing (M. & M.)	Gironcourt (Vogel)	Xeuilley (M. & M.)	Xeuilley calcaire (M. & M.)	Nancy (M. & M.)	Jeanne-Longcourt (M. & M.)	Schiste carton (Nancy)	Champlieu (M. & M.)	La Seigne (Seuils)	Ecroves marne (M. & M.)	Ecroves calcaire (M. & M.)	Louvet mont (P. Marne)	Moelans Glauc. (H. Marne)
	Munch.	Hélien	Sin. m.	Sin. m.	Charm.	Charm.	Teare.	Teare.	Callov.	Oxford.	Oxford.	Aptien	Albien
SiO ₂	42.40	57.90	54.10	50.35	54.85	51.74	44.00	51.95	46.10	53.80	55.55	52	50.60
Al ₂ O ₃	18.70	21.80	21.75	19.85	18.75	24.80	14.00	24.30	15.35	21.90	19.80	23.20	13.47
Fe ₂ O ₃	3.85	4.45	2.95	3.48	4.40	1.97	4.40	3.55	2.05	4.25	3.75	6.80	14.04
FeO	2.20	0.70	1.80	1.58	3.05	3.08	2.10	1.65	2.30	1.70	1.65	1.05	2.00
MnO	0.04	0.01	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.02	0.06	0.01	0.04	0.01	0.03
P ₂ O ₅	6.95	1.65	2.08	2.35	2.80	1.97	1.25	2.30	6.30	2.40	2.50	2.00	2.53
CaO	2.55	0.45	1.30	0.55	0.85	1.20	1.70	0.25	5.15	1.25	0.74	0.45	1.49
Na ₂ O	1.10	0.32	0.33	0.55	0.50	1.44	0.80	0.20	2.80	0.23	0.40	0.23	1.02
K ₂ O	5.10	3.50	3.90	4.05	4.10	3.06	2.60	4.30	4.25	4.00	4.30	3.95	6.48
TiO ₂	0.60	0.35	0.95	0.80	0.75	0.99	0.65	0.90	0.70	0.65	0.70	0.70	0.41
P ₂ O ₅	0.11	0.12	0.14	0.18	0.20	0.08	0.15	0.08	0.16	0.08	0.10	0.03	0.35
Ar. au feu	9.40	9.55	10.70	11.65	9.35	10.07	28.50	11.40	14.80	10.60	10.70	11.20	7.95
Total	100.00	100.80	100.03	99.62	99.65	100.43	100.18	100.90	100.02	100.87	100.23	100.72	100.40

argileuses extraites de diverses roches sédimentaires, on comparera séparément, d'une part, les données qualitatives et demi-quantitatives des Rayons X et de l'analyse thermique et, d'autre part, les données quantitatives globales de l'analyse chimique. C'est la composition globale du mélange qui sera prise en considération et qui servira de terme de comparaison. C'est cette méthode craintive mais sûre qui a été utilisée dans ce travail pour les comparaisons chimiques entre les stocks argileux extraits des roches sédimentaires.

no	21	23	24	25	26	28	10	31	32	33	34	41	47
nom de la roche	Maellin de la Merne Hochelme Met.M	Pexonne vert rouge Met.M	Pexonne rouge Vonges	Day-villiers vert Vonges	Day-villiers vert Vonges	Houseras rouge Vonges	Danet-villiers Met.M	Balmat-lez-Aux Met.M	Bonlieux aux Salles Met.M	Doullieu rouge Vonges	Doullieu vert Vonges	Breil-lez-Haut-maria	Sonnant-cour-Haut-maria
Etage	Albien	Musch	Musch	Kusche	Kusche	Kusche	Lutetien	Kapnick	Kapnick	Kapnick	Kapnick	Sonnant	Breil
SiO ₂	56,90	51,35	50,30	48,30	56,85	54,00	53,20	40,95	54,05	53,45	51,50	50,35	46,40
Al ₂ O ₃	18,45	18,00	20,05	23,10	13,35	20,30	15,60	19,50	14,35	17,55	16,70	20,36	29,20
Fe ₂ O ₃	5,65	6,55	8,90	4,20	7,60	5,25	6,05	2,60	3,70	6,85	6,25	3,35	3,60
FeO	1,40	1,40	1,80	2,05	2,65	1,50	1,44	0,95	1,75	0,38	0,20	1,97	0,43
MnO	0,01	0,02	0,03	0,06	0,14	0,03	0,04	0,04	0,02	0,00	0,01	0,07	0,01
MgO	1,35	4,50	4,15	3,40	2,85	3,05	0,65	10,90	7,90	3,60	4,05	2,50	0,30
CaO	0,50	1,85	0,75	0,40	1,55	0,85	1,16	1,20	2,00	1,13	2,51	0,90	0,27
N ₂ O	0,18	0,30	0,33	0,15	0,32	2,00	5,90	2,65	1,30	2,10	2,50	1,04	4,10
K ₂ O	3,45	7,10	6,50	6,15	6,50	6,20	6,50	2,65	5,35	6,70	5,40	5,44	3,55
T O ₂	0,75	0,65	0,55	0,65	0,65	0,70	0,75	0,45	-0,50	0,60	0,60	0,77	1
P ₂ O ₅	0,04	0,14	0,09	0,12	0,36	0,14	0,015	0,15	0,15	0,00	0,00	0,24	0,03
Facte au feu	11,90	8,85	6,85	6,10	6,85	6,00	9,05	27,90	8,04	7,40	9,25	12,68	11,20
Total	100,18	100,71	100,30	100,68	99,61	100,02	99,95	99,94	99,11	101,06	100,23	99,77	100,02

RESULTATS DES ANALYSES CHIMIQUES DE LA PHASE ARGILEUSE EXTRAITE DES ROCHES SÉDIMENTAIRES (suite)

T A B L E A U N° 3

VI. - Méthodes diverses

Les méthodes principales qui ont déjà été décrites ne sont pas les seules. Il est indispensable de citer les autres méthodes qui sont utilisées, soit qu'elles aient été utilisées incidemment dans ce travail, soit qu'on en ait tiré argument, soit qu'elles représentent un intérêt spécial. Elles seront envisagées successivement dans l'ordre suivant :

- Microscope polarisant.
- Microscope électronique.
- Déshydratométrie.
- Dilatométrie.
- Pectographie.

A) LE MICROSCOPE POLARISANT.

L'utilité du microscope polarisant a déjà été examinée auparavant du point de vue du pétrographe. Pratiquement, s'il est extrêmement utile pour prendre connaissance du microfaciès et de la structure des roches argileuses, il ne peut être d'un grand secours pour la détermination des minéraux argileux dans les lames minces de roches, surtout quand elles sont impures, ce qui est le cas général. CAYEUX, raisonnant en pétrographe, écrit : « Somme toute, on est fondé à dire que la part du microscope dans le diagnostic des argiles est des plus restreintes..... Cela est tellement vrai que si l'on suppose associés des représentants de ces argiles y compris la Kaolinite en lamelles régulières, il est de toute impossibilité d'en faire le départ sous le microscope. » CAYEUX ajoute que ce qui l'intéresse avant tout, c'est l'argile considérée d'une façon globale plutôt que la présence de telle ou telle variété minéralogique. On voit que même avec ce souci, qui paraît aujourd'hui modeste, il ne parvient pas à la déceler dans les coupes minces (CAYEUX 1916, 61).

Quand on se place au point de vue du minéralogiste, on n'a pas de satisfactions beaucoup plus grandes. A part quelques types bien cristallisés sur lesquels les minéralogistes ont pu faire de bonnes déterminations (Dickite et Nacrite par exemple qui sont des variétés de Kaolinite), l'examen au microscope de beaucoup d'argiles se montre décevant. LACROIX écrit : « L'examen microscopique permet de voir que beaucoup de ces argiles sont constituées, soit en partie soit en totalité, par une substance cristallisée formant des lamelles plus ou moins enchevêtrées, perpendiculaires à la bissec-

trice aiguë négative..... Je ne puis affirmer que dans toutes les argiles étudiées le produit cristallin soit exactement le même car..... le nombre des vérifications optiques que l'on peut faire est peu élevé » (LACROIX 197).

Si des déterminations ont pu être faites au point de vue des propriétés optiques des minéraux argileux sur des échantillons exceptionnels, elles ne nous sont pas d'un grand secours pour l'examen de la phase argileuse extraite d'une roche qui se trouve d'ailleurs être assez fine à cause des nécessités de l'extraction.

Une revue des propriétés optiques des minéraux argileux a été faite par P. URBAIN (374). Un progrès considérable a été fait par C.-E. MARSHALL (264) qui fit des mesures d'indice et de biréfringence sur des suspensions de minéraux argileux types.

L'ensemble de tous les travaux faits en ce domaine est considérable mais nécessite une véritable spécialisation et souvent un outillage particulier. Enfin, pour des mois de travaux très difficiles, ils n'aboutissent pas à la précision d'une analyse aux Rayons X qu'on peut obtenir en quelques heures.

De plus, ces techniques déjà difficiles ne s'appliquent pas à des mélanges et c'est pourquoi elles n'ont pas été utilisées ici, si ce n'est pour quelques essais de vérification sur la biréfringence des particules, leur pureté vis-à-vis du quartz ou l'habitus de leurs cristaux.

B) LE MICROSCOPE ÉLECTRONIQUE.

Le microscope électronique permet de compter sur un pouvoir de résolution de 20 Å correspondant à un grossissement de 100.000 diamètres. Cet instrument est donc tout à fait adapté à l'examen des particules argileuses. Les résultats ont été tout à fait intéressants (HOFMANN et ses collaborateurs 178; HUMBERT, SHAW, MARSHALL et CALDWELL, 181, 265; ENDELL 103; MATHIEU SICAUD et LEVASSEUR 268; REIS et ses collaborateurs 1.5). Les minéraux argileux apparaissent avec des formes variées : la Kaolinite en forme de plaques hexagonales, l'Halloysite en forme de bâtonnets. Dans le groupe de la Montmorillonite, la Montmorillonite elle-même et la Beidellite sont en plaques assez irrégulières et la Nontronite ainsi que la Saponite et l'Hectorite sont en lattes ou en sabres. L'Illite est phylliteuse; l'Attapulgite et la Sépiolite en forme d'aiguilles. La connaissance de ces formes est très intéressante, elle rend compte de nombreuses propriétés des minéraux, en particulier des propriétés de surface et de l'obtention plus ou moins facile des sédimentations. On a déjà discuté précédemment les rapports entre l'habitus et la

structure des minéraux : on a vu que s'il peut y avoir coïncidence entre structure en chaîne et habitus fibreux chez l'Attapulgite, ceci n'existe pas pour le Chrysotile. La planche III représente une très belle photographie de cristaux de Sépiolite au microscope électronique. Cette photographie est due à la bonne obligeance de M^{me} MATHIEU-SICAUD, à laquelle j'avais communiqué un échantillon de Terre à dégraisser de Salinelles. Il me paraît important de souligner que tous les minéraux fortement magnésiens des groupes argileux ont un habitus allongé en latte, sabre, bâtonnet ou fibre. La question a déjà été discutée par ROSS et HENDRICKS (340).

C) COURBES DE DÉSHYDRATATION.

La méthode consiste à enregistrer la perte de poids d'un minéral en fonction de la température régulièrement croissante. Cette méthode donne des renseignements plus complets que l'analyse thermique différentielle. En effet, elle donne non seulement la température à laquelle se font les départs d'eau mais la quantité d'eau perdue pour chaque départ. Cette méthode fut mise au point par H. LONGCHAMON (241). D'autres manières de bâtir les courbes de déshydratation sont signalées par NAGELSCHMIDT (305). Ces méthodes n'ont pas été utilisées dans ce travail : elles sont surtout utiles pour les études de structure.

D) PECTOGRAPHIE.

Cette méthode a été proposée par P. BARY (15) pour l'étude des colloïdes; elle a été appliquée aux argiles par HENIN et ses collaborateurs (169-171). Elle consiste à plonger dans un verre contenant une suspension colloïdale à 1 % une lame porte-objet inclinée. Si la température est suffisante, la solution s'évapore, un dépôt se fait sur la lame de verre et l'on s'aperçoit que son aspect peut varier. Le résultat le plus net est obtenu avec l'Attapulgite qui donne un dépôt finement strié parallèlement au plan d'évaporation. Par contre, la Kaolinite, la Montmorillonite et l'Illite donnent des plaques. Enfin la Nontronite donne aussi des lignes parallèles mais moins nettes que celles de l'Attapulgite.

Ces résultats montrent une coïncidence entre l'aspect des pectogrammes et la forme des cristallites argileux. Cette méthode permet d'obtenir une première indication rapide qui peut être utile surtout dans le cas de l'Attapulgite.

LES FAITS

Etude systématique de Roches d'origine marine

Ce chapitre quatrième sera consacré à l'étude systématique de roches sédimentaires argileuses considérées comme marines. Il n'y a doute pour aucune d'entre elles, sauf celle de Crévic (Rhétien n° 3 bis) sur laquelle les stratigraphes se partagent. Presque toutes ces roches ont été prélevées en Lorraine et la localisation de leurs gisements est reportée sur la carte schématique, qui constitue la figure n° 10.

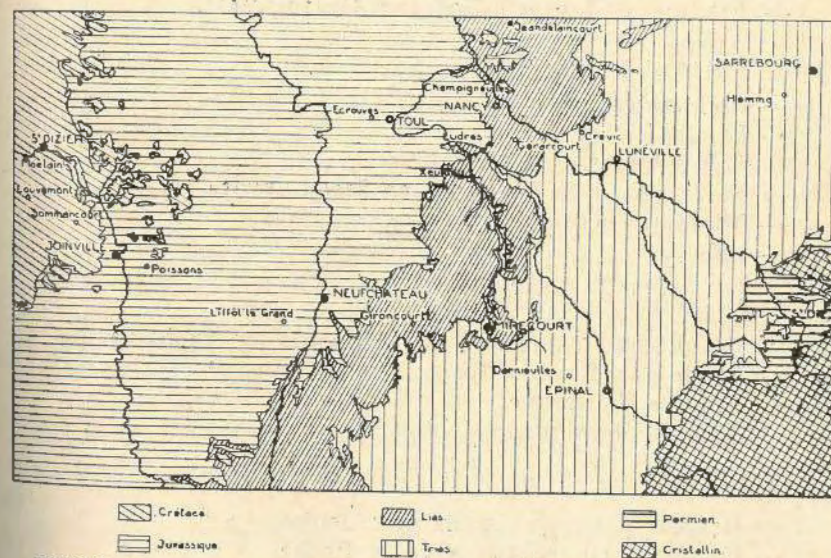


FIGURE 10. — Esquisse géologique de la Lorraine situant les principaux affleurements des roches marines étudiées.

Le plan suivi pour cette étude systématique sera presque toujours identique. Seuls seront sautés les paragraphes correspondant aux essais qui n'ont pu être réalisés. Ce plan est le suivant :

— Numéro d'ordre.

Etage stratigraphique.

Lieu (Département)

Nom de la Roche.

Illustration n° X.

1° GÎTE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

- Gîte.
- Paléogéographie.
- Stratigraphie.
- Milieu de genèse.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

- Examen macroscopique.
- Examen microscopique.
- Produits de lavage (Minéraux. Organismes).

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

- Carbonates.
- Insolubles.
- Sels solubles.
- Fer exprimé en Pyrite ou en Sesquioxyde.
- Minéraux accessoires.
- pH.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

- Résumé des conditions de sédimentation probable.
- Etude aux Rayons X.
- Analyse thermique.
- Analyse chimique.

5° CONCLUSION.

- Résumé des acquisitions précédentes.
- Formule représentative de la Roche.

— 1 —

MUSCHELKALK SUPÉRIEUR DARNIEULLES (Vosges) Marne en plaquettes

Illustration : Rayons X, planche IV, figure 5.

1° GÎTE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Darnieulles se trouve à 7 km. 500 à l'ouest d'Epinal (Vosges). A 1.500 m. à l'ouest du pays, au bord de la route de Gorhey, se trouve une petite exploitation de moellons. Le niveau géologique est le Muschelkalk supérieur calcaire (74-160-161). Il s'agit de la partie inférieure de ce sous-étage qui est caractérisé dans la région par des calcaires à entroques roses clair qui forment un excellent moellon. Il est fréquent que les calcaires à entroques alternent avec des calcaires sublithographiques. C'est le cas dans cette carrière où la base de celle-ci est formée d'un calcaire gris fumé à grain fin. Les bancs de calcaires à entroques sont séparés tous les 2 ou 3 décimètres par des lits de 1 à 2 centimètres d'une marne dure qui se débite en plaquettes esquilleuses. C'est l'un de ces minces niveaux marneux qui est étudié ici.

Il semble que la sédimentation ait été rythmique. On peut observer fréquemment dans la région la périodicité du phénomène de sédimentation. Après le dépôt de débris de crinoïdes, une vase calcaire se dépose puis une vase plus argileuse, puis à nouveau la vase calcaire et le calcaire à entroques. C'est au niveau de la vase argileuse que les bancs se disjoignent, après quoi les moellons apparaissent comme formés d'une partie médiane à entroques entre deux parties de calcaire sublithographique. Le milieu de sédimentation est défini comme marin. On peut imaginer qu'il s'agit d'un envasement périodique de prairies de crinoïdes.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une marne qui fait immédiatement effervescence. Elle se débite en petites écailles aplaties de 1 ou 2 cm² de surface et de quelques millimètres d'épaisseur. Sa couleur est gris beige.

L'examen microscopique donne les renseignements suivants : L'ensemble apparaît comme finement granuleux. La calcite empêche

presque partout de voir la matière argileuse. La texture normale à la stratification est homogène. La texture parallèle à la stratification montre la phase argileuse dans les biseaux de la plaque mince, là où les grains de calcite paraissent plus clairsemés. Au grossissement 50, cette phase argileuse paraît presque isotrope et floconneuse, c'est-à-dire agglomérée en petites sphères. Au grossissement 300, ces sphérules deviennent plus visibles et sont entourées de grains de calcite. Quelques lames faiblement biréfringentes sont perceptibles.

La calcite est formée de cristaux isolés les uns des autres et sans forme bien définie. La majorité a 5 μ de diamètre. Les tailles se répartissent entre 5 μ et 40 μ . Quand la plaque devient épaisse, les grains de calcite des différents plans dans la profondeur du champ se superposent et ils paraissent occuper une surface de plus en plus grande.

Les quartz sont en forme d'éclats aigus. Les tailles extrêmes visibles vont de 5 μ à 40 μ . Ils sont dispersés à travers la roche et forment une proportion faible. Les minéraux accessoires sont quelques rares muscovites, un feldspath et une matière ferrugineuse diffuse avec quelques concrétions de limonite. Il n'y a pas trace d'organismes.

Le lavage n'a pu être opéré car la roche ne se délite pas.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 62 % de calcite. Il n'y a pas de dolomite ni même de magnésie adsorbée ($MgO = 0\%$). Il faut ajouter 0,8 % d'insolubles, 0,6 % de fer calculé en oxyde. Le pH de la roche est 8,3.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

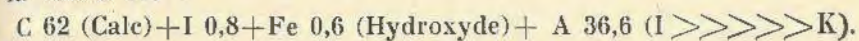
Les conditions de sédimentation de cette marne sont celles d'une boue très calcaire. Les diagrammes des Rayons X donnent les renseignements suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Ombre entre 13,88 et 9,82 — 9,82.TF — 7,15.f — 4,99.TF — 3,57.tf — 3,33.TF. Les minéraux ainsi déterminés sont l'illite dont une partie est sans doute hydratée et la Kaolinite. On peut supposer, par comparaison avec d'autres échantillons, la présence de l'Hydrobiotite sans pouvoir l'affirmer. La proportion de Kaolinite est inférieure à 10 % (pl. IV, 5).

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation

sont celles d'une boue très calcaire. Le pH est 8,3. La formule de la roche est :



— 2 —

MUSCHELKALK SUPÉRIEUR HÉMING (Moselle) Marne

*Illustration : Photo-plaque mince planche I figure 1.
Analyse chimique tableau 7. Spectre planche IV figure 6.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans une grande carrière située à 800 m. au Sud-Est de la cimenterie d'Héming. La base des couches exploitées est formée de très beaux calcaires massifs. Dans les 5 mètres inférieurs, dominant des calcaires blancs, parfois oolitiques; au-dessus, viennent 3 mètres de calcaire à entroques rosé et massif. Au contraire le sommet des couches exploitées est formé d'une alternance de dalles très régulières et très plates avec des marnes dures. Dans les mètres inférieurs, les dalles contiennent encore des débris d'entroques; dans la partie supérieure, les dalles sont faites d'un calcaire grumeleux marneux. Il est fréquent que le cœur en soit bleu alors que le pourtour des moellons est jaunâtre. C'est entre deux dalles de la partie supérieure de la carrière de Héming (partie ouest) qu'un échantillon de marne a été pris. Au point de vue stratigraphique, il est probable qu'on se trouve là à la partie moyenne du Muschelkalk calcaire (160-161). Les niveaux marneux y sont généralement fréquents par opposition aux couches à Cératites typiques qui les surmontent et aux calcaires à entroques qui sont en dessous.

Le milieu de genèse est défini. Il s'agit d'une mer éloignée des côtes et tranquille.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La marne choisie est grise et compacte. Cependant elle se raie facilement et se délite dans l'eau par un séjour prolongé. Elle est

finement stratifiée et paraît complètement homogène.

Au microscope, l'aspect général au faible grossissement est celui d'un calcaire où les grains de calcite sont isolés dans un fond très faiblement biréfringent. L'allure est très homogène. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques. Sur les biseaux de la lame la matière argileuse apparaît. Elle est formée de petits sphérules presque amorphes au milieu desquels on a du mal à distinguer des paillettes très faiblement biréfringentes.

La calcite est presque uniquement constituée de cristaux rhomboédriques. Rares sont ceux qui n'ont pas leur forme cristalline propre. Ces cristaux sont presque toujours isolés les uns des autres, les tailles de ces rhomboèdres oscillent entre 3 et 40 μ ; la majorité est entre 5 et 10 μ .

Les quartz sont petits, rares et extrêmement dispersés. Leur taille est de 5 μ environ. Les seuls minéraux accessoires visibles sont un oxyde de fer opaque et un léger fond de limonite diffuse. Il n'y a pas trace de fossiles.

Le lavage a révélé des concrétions de pyrite épigénisée en oligiste. Il n'y a pas d'organismes.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 42 % de calcaire. Il n'y a pas de dolomite. 2,28 % de MgO ont été dosés mais les raies de la dolomite n'apparaissent pas aux Rayons X. Ce Mg est donc soit mêlé à la calcite soit adsorbé sur la phase argileuse. Insolubles : 0. Solubles dans l'eau : 0. Fer : 0,36 exprimé en oligiste. Le pH est 8,2.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation doivent correspondre à celles d'une boue très calcaire ayant déjà pourtant certains caractères d'une vase. Contrairement à l'échantillon précédent, l'envasement des prairies d'encrines du Muschelkalk a dû être ici beaucoup plus long. Certaines fermentations propres aux vases ont déjà pu se produire, en particulier la genèse de sulfures. Ce n'est que plus tard que ces sulfures furent transformés. Les diagrammes de Rayons X donnent les indications suivantes :

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14,2 f. floue — 11,33 f. floue — 10.TF — 7,15.f — 5 F. — 4,69.tf — 4,27.tf. — 3,58.tf. — 3,34.TF. Ceci montre la présence de l'Hydrobiotite, de la Chlorite, de l'Illite plus ou moins hydratée et de la Kaolinite. C'est l'Illite qui domine de beaucoup. On peut considérer la propor-

tion de la Kaolinite comme voisine de 10 % par rapport à la somme des minéraux micacés (pl. IV, 6).

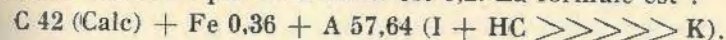
Le deuxième spectre a été fait sur une plaquette glycérolée. 14 et 11 floues — 10.F — 7.tf — 5.F — 4,70.f — 3,34.TF. On ne voit aucun changement, si bien que la présence de la Montmorillonite n'est pas vraisemblable.

Le troisième spectre sert de témoin au spectre précédent en étant fait sur le même matériel, préparé et monté dans les mêmes conditions. Ombre entre 14 et 10 intensifiée vers 11. — 10.F — 7.tf — 5 m — 4,70.tf — 3,58.tf — 3,34.TF. On ne voit aucune différence avec le premier spectre. Le résultat global est exprimé par $I + HC >>>>> K$ avec environ 10 % de Kaolinite.

L'analyse chimique qui est figurée au tableau n° 7 indique un rapport $\frac{SiO_2}{Sesq} = 3,97$. La potasse représente 5,66 et la magnésie 7,71 du poids de silicate déshydraté. Ceci manifeste l'importance des minéraux micacés dans le mélange.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue calcaire où commencent les phénomènes réducteurs propres aux vases. Le pH de la roche est 8,2. La formule est :



— 3 —

RHÉTIEN
GIRONCOURT-SUR-VRAINE (Vosges)
Argilite

Illustration. Analyse chimique tableau n° 7.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'Argilite de Gironcourt a été prélevée près de la grande exploitation de sable qui se trouve à 1.500 m. au Sud du village. Au sommet de la série sableuse se trouve un niveau d'Argilites schisteuses noires où GUILLAUME a trouvé en 1945 *Avicula contorta*. Cette découverte permet de croire qu'on se trouve en présence d'une for-

mation marine et c'est à cette supposition que l'examen pétrographique doit être confronté (documents : MINOUX 291 — RICOUR 327 — MINOUX et RICOUR 292, et communication personnelle de M. J. RICOUR que je remercie).

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'Argilite de Gironcourt-sur-Vraine se présente en petites plaquettes noir violacé, analogues à de petites ardoises. Chacune de ces plaquettes a quelques centimètres carrés et un ou deux millimètres d'épaisseur. Ce délit est assez caractéristique des lentilles argileuses du Rhétien. On a souvent affaire à des pélites mais ce n'est pas le cas ici puisque cette roche ne contient presque aucun élément détritique. Cependant il est utile de remarquer que la base de ce niveau d'Argilites noires contient des petits galets de grès de forme allongée ou ressemblant à des palettes.

Au microscope l'allure générale du microfaciès est celui d'une Argilite. La section mince n'est possible que dans le plan parallèle à la stratification. La texture est homogène et cryptocristalline. La phase argileuse n'est pas marquée, mais elle est formée de phyllites extrêmement fines et très peu biréfringentes. On ne voit pas de calcite. Quelques grains de quartz extrêmement fins, de quelques μ de diamètre sont visibles de ci de là. Ils ont la forme d'éclats. On remarque quelques rares paillettes de mica. Les minéraux accessoires visibles sont quelques granulations de limonite et une imprégnation générale ocre de sesquioxyde de fer. Le lavage de cette Argilite n'a pas été possible.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'Argilite de Gironcourt ne contient pas de carbonate ni de dolomite ni de sels solubles dans l'eau. Par contre elle contient une faible quantité d'insolubles (1,4 %) et de fer exprimé en sesquioxyde (0,94 %). Le pH de la roche est 7,5.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase marine non calcaire. Deux diagrammes de Rayons X ont été faits. Le premier spectre a été obtenu sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes calculées mènent au résultat suivant :

Ombre entre 14 et 10 — 10.F — 7,18.F — 5,05.AF — 4,70.H — 4,27.f — 3,60.AF — 3,37.TF.

Ces lignes montrent la présence de la Kaolinite et de l'Illite peut-être hydratée pour une part. Il était possible que l'ombre comprise

entre 10 et 14 A° puisse correspondre à un minéral défini à 14 A°. On a cherché à le mettre mieux en évidence. Pour cela un deuxième spectre a été fait, après :

- a) traitement à l'acétate de sodium et au chlorure de calcium;
- b) et séchage au benzène; le résultat est le suivant :

10 floue — 7 floue — 5 floue — 4,50.F — 3,60.m — 3,34.m. Aucune raie n'a été soulignée à 14 A° par le traitement. On peut donc conclure à un mélange de Kaolinite et d'Illite plus ou moins hydratée; la proportion de Kaolinite est d'environ 30 %.

L'analyse chimique dont les résultats sont exposés au tableau SiO₂

n° 7 montre que le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq.}} = 4,36$. La proportion de potasse

est de 3,85 et celle de la magnésie de 1,81 pour 100 grammes de silicates déshydratés. Ceci confirme le rôle appréciable de la Kaolinite dans le mélange.

5° CONCLUSION.

Les conditions de sédimentation de l'Argilite de Gironcourt sont celles d'une vase marine non calcaire. Le pH est 7,5. La formule caractéristique de la roche est :

$C\ 0 + I : 1,4 + \text{Fer } 0,94 (\text{sesquioxyde}) + A\ 97 (I \gg K)$.

— 3 bis —

RHÉTIEN
CRÉVIC (Meurthe-et-Moselle)
Marne rouge

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

LEVALLOIS en 1851 (235) a défini au-dessus des grès Rhétiens et sous les marnes bleues du lias une couche de marne rouge à laquelle on a donné son nom. Cette formation est très caractéristique et forme un bon repère. Son épaisseur est assez variable depuis 1 mètre jusqu'à 12 mètres.

Le milieu de genèse de ces marnes de LEVALLOIS n'est pas clairement défini. En effet ces marnes se sont jusqu'à présent révélées complètement azoïques et on manque d'arguments pour imaginer la genèse de ce niveau. Les auteurs se partagent : les uns voient dans ces marnes le début de la sédimentation marine du lias

après l'épisode sableux du Rhétien proprement dit. Les autres, considérant la couleur de cette série marneuse, y voient une récurrence du faciès lagunaire du Keuper. Et ceci a servi à certains auteurs, qui voient le Trias se prolonger jusqu'au Rhétien, à étayer leur hypothèse. Les principaux documents sur ces questions sont les suivants : LEBRUN 225; LEVALLOIS 233-236; TERQUEM et PIETTE 357; BENOIST 18; BLEICHER 24-26; NICKLES 309; CORROY 75; MINOUX 291; RICOUR 327; MINOUX et RICOUR 292; MAUBEUGE 276.

On avait d'abord songé que ces marnes de LEVALLOIS étaient un produit de remaniement du Keuper (18) puis on songea plutôt à une récurrence du faciès de ce dernier. Tout argument permettant de préciser le milieu de genèse de ce niveau est donc intéressant et à verser au débat. C'est la raison pour laquelle cet échantillon a été étudié bien que ses conditions de genèse *ne soient pas définies*, mais on a vu qu'elles sont définissables; il suffit pour cela de découvertes paléontologiques et pétrographiques nouvelles. L'échantillon ici étudié provient de Crévic (M.-et-M.) où le faciès rouge des marnes de LEVALLOIS est typique.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une marne rouge qui fait une effervescence vigoureuse aux acides dilués. Au microscope l'allure générale du micro-faciès est celui d'une marne. La phase argileuse est visible en section mince : la texture est floconneuse et la calcite se répartit autour des sphérules argileux. Ces derniers paraissent presque totalement isotropes. Les grains de calcite ont de 5 à 15 μ et possèdent souvent leurs formes rhomboédriques. Parfois des îlots calcaires apparaissent au sein de la roche. Les quartz sont très dispersés. Ils ont la forme d'éclats et leur taille varie de 10 à 60 μ avec une taille habituelle de 20 μ . Une grande quantité de traînées ocreuses sont visibles en lumière naturelle, par contre aucune trace d'organismes n'est appréciable.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 44 % de calcite et pas de Dolomite ni de sels solubles dans l'eau. On peut doser 1,8 % d'insolubles et 0,58 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH de la roche est 8,3.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Deux diagrammes de Rayons X ont été faits. Le premier a été obtenu sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Le calcul des équidistances a donné le résultat

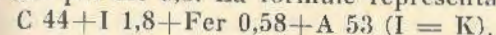
suivant : Ombre entre 12 et 10 — 10 F — 7,15 TF — 5 m — 4,27 f et circulaire — 3,58.TF — 3,34.F.

Ces résultats montrent une forte proportion de Kaolinite dans le mélange. Pour mieux apprécier les raisons de l'ombre comprise entre 10 et 12 A°, un spectre a été fait après traitement à l'acétate de sodium et au chlorure de calcium puis séchage au benzène. Mais le résultat n'a donné que des cercles flous impossibles à interpréter.

Au total, en tenant compte de l'ensemble des minéraux micacés vis-à-vis de la seule Kaolinite on parvient à apprécier 50 % de celle-ci dans le mélange.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse n'est pas défini. La roche est calcaire rouge et son pH est 8,3. La formule représentative est :



— 4 et 5 —

SINÉMURIEN

XEUILLEY (Meurthe-et-Moselle)

Marne et Calcaire argileux

Illustration : Analyse chimique, tableau 7 (marne).

Analyse chimique, tableau 7 (calcaire).

Spectre planche IV, figures 7 et 8.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Ces échantillons ont été prélevés dans la grande carrière des fours à chaux hydraulique de Xeulley. Le front de taille de celle-ci et ses environs donnent une coupe du lias inférieur depuis les marnes de Levallois jusqu'au milieu des marnes à Hippopodium. L'épaisseur des marnes de Levallois ne peut être précisée car un puits fait dans celles-ci sur une profondeur de 9 m. 20 n'a pas atteint le grès rhétien. Les prélèvements ont été faits dans le front de taille médian qui correspond à la zone à *Coroniceras bisulcatum* ou calcaire à gryphées. Il s'agit ici de la base du Sinémurien, sans qu'on l'oppose au Lotharingien (BENOIST, 19; TERQUEM et PIETTE, 357; BRACONNIER, 33; BLEICHER, 26; CORROY, 73; GERARD et GARDET, 118; MAUBEUGE, 275).

Le milieu de sédimentation est marin. Plus précisément, l'allure du fond marin peut être indiquée grâce à la paléontologie (GERARD et GARDET, 118). Les animaux fossiles sont des ammonites, pélagiques, qui n'indiquent rien, et des grands lamellibranches. Les *Chlamys* ne peuvent vivre que par 30 mètres de fond mais leur ornementation est ici plus fine que dans la région d'Hettange : ils sont plus éloignés des côtes. Les grands Plagiostomes, Liogryphées et Pholadomies, indiquent un fond vaseux où, pour échapper à l'agitation des eaux, les animaux s'épaississent et s'enfouissent. La mer est agitée, comme en témoignent les innombrables débris de coquilles, d'échinodermes et de polypiers, ainsi que les extinctions brutales et répétées des colonies de Lamellibranches. De plus, la sédimentation est rythmique car les bancs calcaires alternent régulièrement avec les bancs marneux. On ignore s'il s'agit d'un rythme dans l'agitation des eaux ou dans la profondeur des eaux. Au total, mer peu profonde et agitée. Ces considérations précises acquises par les méthodes traditionnelles de la paléobiologie, vont être confrontées avec celles qu'indique la pétrographie.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Deux échantillons ont été prélevés. L'un au cœur d'un banc calcaire, l'autre au cœur d'un banc marneux. La limite entre ces deux faciès n'est pas précise et l'on passe insensiblement d'un faciès à l'autre. L'industrie n'exploite que le calcaire mais bien souvent des moellons encore trop marneux sont emportés avec les moellons calcaires. Ils ne se délitent que sous l'influence de la pluie. L'ensemble est gris bleu, de cette couleur caractéristique des dépôts argileux franchement marins.

Au microscope, on distinguera la description de la marne et celle du calcaire.

a) *Marne de Xeulley*. — L'aspect général au microscope est celui d'un calcaire contenant une petite quantité de débris organiques. La texture perpendiculaire à la stratification révèle de temps à autre une sorte d'amygdale lenticulaire plus détritique. On a là l'aspect microlenticulaire. La texture parallèle à la sédimentation montre que la calcite masque presque partout la matière argileuse. Celle-ci apparaît aux biseaux des plaques; elle est cryptocristalline et parsemée de rhomboédres de calcite et de grains de quartz.

La calcite constitue tous les organismes. Par ailleurs, elle forme la pâte de la roche. Elle est constituée de grains dont la moitié est rhomboédrique et l'autre de forme quelconque. Ces grains sont compris entre 3 et 40 μ .

Le quartz est assez abondant. Il a la forme de petits éclats

irréguliers. La taille la plus fréquente est de 40 μ ; ils peuvent varier de 10 à 50 μ . Dans les amygdales détritiques la calcite et le quartz sont seuls visibles et leurs grains peuvent atteindre 100 μ . La pyrite et la limonite sont présentes. Les débris d'organismes sont très nombreux; la grosse majorité est formée de morceaux de coquilles de mollusques qui sont cassées et déposées en tous sens. A signaler aussi les têtes d'Echinodermes et des fragments de Foraminifères.

Le lavage montre de la pyrite abondante, un peu de magnétite et d'innombrables débris de Lamellibranches. Les organismes isolés sont : Marginulina, Dentalina, Nodosaria, Robulus, Ostracodes, débris d'Echinodermes.

b) *Calcaire de Xeulley*. — L'aspect général est celui d'un calcaire à organismes. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques. L'ensemble est homogène et formé de petits cristaux de calcite enchevêtrés.

Les grains de calcite de la pâte sont très réguliers et voisins de 5 μ . Par contre, les débris organiques sont constitués de calcite cristallisée en jeu de patience dont les éléments peuvent atteindre 50 μ . D'autre part, la roche contient parfois des îlots de quelques millimètres où la calcite est largement recristallisée (30 μ) sans qu'on puisse attribuer cette cristallisation à l'existence passée d'un débris fossile. Des filonnets calcaires parcourent la roche.

Le quartz est dispersé. Il a des formes anguleuses. La taille est régulière et aux environs de 20 μ . Les organismes sont de nombreux débris de coquilles très déchiquetés, auxquels il faut ajouter des files de loges analogues au Nodosaria et des débris de Crinoïdes.

Le lavage n'a pas été possible.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La marne contient 44,6 % de Calcite et pas de Dolomie (MgO = 0,3 %); 1,9 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; enfin, 0,48 % de Pyrite. Le pH est 7,6.

Le calcaire contient 80 % de Calcite, 2,1 d'insolubles, 0,92 % de Pyrite. Le pH est 8,5.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation correspondent à un fond vaseux où un milieu réducteur permet la genèse de la pyrite. Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants :

Le premier spectre concerne Xeulley marne; il a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14 m — Ombres entre 14 et 10 — 9,90 AF — 7,09

AF — 5 m — 4,70 tf — 4,29 f — 3,59 AF — 3,36 TF. Ces lignes indiquent la présence de minéraux du groupe de l'Hydrobiotite-Chlorite, de l'Illite et de la Kaolinite. L'Illite est dominante. La proportion de Kaolinite est évaluée à 40 % (pl. IV, 7).

Le deuxième spectre, préparé de la même manière que le premier, concerne Xeuilley calcaire. Ombre entre 14 et 10, mais plus intense à proximité de 10 — 10 TF — 7,2 AF — 5,05 AF — 4,75 tf — 4,28 f granuleuse — 3,60 AF — 3,39 TF et granuleuse. Ces lignes indiquent un mélange analogue. La Kaolinite est sans doute moins abondante. On fixera sa proportion à 30 % environ (pl. IV, 8).

L'analyse chimique, faite sur les deux phases argileuses extraites des deux échantillons, donne un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,9$ et 4,2; la

proportion de potasse est 4,4 et 4,65; celle de magnésie, 2,35 et 2,70 pour 100 grammes de silicate déshydraté. Ceci indique, sauf erreur d'interprétation, une plus grande abondance des minéraux micacés dans le calcaire par rapport à la marne.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase bleue très calcaire et réductrice. Les pH sont 7,6 et 8,5 et les formules représentatives de ces roches :

C 44,6+I 1,9+Fe 0,48 (Pyrite)+A 53 (I+HC>K).

C 80+I 2,1+Fe 0,92 (Pyrite)+A 17 (I+HC>>>K).

— 6 —

LOTHARINGIEN
GÉRARDCOURT (Meurthe-et-Moselle)
Shales marneux

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé dans la tranchée de l'autostrade Paris-Strasbourg quand, à une dizaine de kilomètres au Sud de Nancy, il passe à proximité des villages de Fléville et de Lupcourt. Près de Gérardcourt, cet autostrade traverse une butte située entre le ruisseau d'Hurpont et le canal de jonction Moselle-Meurthe. Un échantillon de marne à Hippopodium m'avait été communiqué par M. MAUBEUGE, provenant de trous de bombes des environs de

Saulxures-les-Nancy. Le bel affleurement artificiel de Gérardcourt offrait, en place, une roche saine et cet échantillon fut préféré. Il s'agit en effet du faciès marneux développé dans la zone à Deroceras Dudressieri du Lotharingien moyen (MAUBEUGE, 275). Ce niveau est généralement appelé Marnes à Hippopodium ponderosum, malgré la rareté relative de ce fossile. Il est épais de 25 mètres (GERARD et GARDET, 118; CORROY, 73; MAUBEUGE, 275 et 277; COUDERT et MATHIEU, 79).

Les observations stratigraphiques permettent de reconstituer le milieu de genèse. Après la sédimentation rythmée du Sinémurien, sensu stricto, des incidents se produisent pour donner naissance au sommet de la zone à Prototheutis acutus à la surface d'érosion décrite par GERARD et GARDET (101). On peut y voir un banc durci tarauté ferrugineux contenant des nodules phosphatés. Des débris fossiles usés et roulés ainsi que des huitres plates témoignent d'un élèvement du fond. Aussitôt après, la mer plus profonde se rétablit et une sédimentation principalement marneuse s'installe dans le faciès des Marnes à Hippopodium. La majorité des Lamellibranches a disparu et les Ammonites deviennent petites. Le raisonnement du paléontologiste indiquerait (101) qu'il s'agit d'une mer relativement profonde, de l'ordre de 100 mètres. C'est à ces données paléontologiques et stratigraphiques que doivent être confrontés les résultats de l'étude pétrographique.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est un shales marneux. Elle se débite en tablettes tendres de 1/2 cm d'épaisseur. Elle est de la couleur bleu-gris si fréquente pour les marnes marines. Les joints de ces shales montrent des paillettes brillantes qui ressemblent à la muscovite.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une Argilite car la Calcite, peu abondante, ne gêne pas l'observation de la phase argileuse. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques. La phase argileuse est crypto-cristalline et les minéraux argileux montrent assez souvent des paillettes de 5 μ de long.

La calcite est peu abondante et se trouve en cristaux de forme irrégulière de 10 à 40 μ . Les quartz sont très rares et petits (5 à 10 μ). Les minéraux accessoires sont les suivants : nombreuses sphères concrétionnées de marcassite et grains de pyrite; imprégnation de limonite et grands cristaux de gypse correspondant à l'oxydation des pyrites. Il n'y a pas de trace d'organismes.

Le lavage permet de remarquer une grande abondance de pyrite en masses arrondies formées par l'accumulation de nombreux petits cubes. Ces agrégats cristallins voisinent avec des morceaux de

roches, des cristaux de calcite et quelques cristaux de gypse. Les organismes qui ont été isolés sont : Frondicularia, Marginulina, Nodosaria, Valves d'Ostracodes, Pédicelles d'Oursins.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 7,2 % de Calcite et pas de Dolomite; 2,4 % d'insolubles et 4 % de gypse; enfin, 1,04 % de Pyrite. Le pH est 7,6.

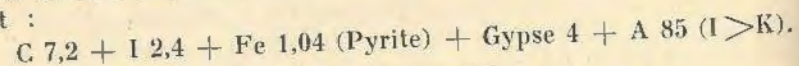
4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation de la marne de Gérardcourt peuvent être considérées comme celles d'une vase peu calcaire, au sein de laquelle un milieu réducteur a régné, favorisant la formation des sulfures. Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une solution dispersée à l'ammoniaque. Ombres entre 14 et 9,82 avec assombrissements aux environs de 12 — 9,82 TF — 7,09 TF — 4,98 AF — 3,59 F — 3,33 TF. Ces lignes montrent un mélange d'Illite qui peut être hydratée pour une part, avec de la Kaolinite. Il est possible qu'il y ait un peu d'Hydrobiotite responsable de l'assombrissement à 12 A°. La proportion de Kaolinite vis-à-vis du total des minéraux micacés est évaluée à 40 %.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase noire et sulfureuse. La formule représentative est :



— 7 —

CHARMOUTHEN
NANCY E.N.S.G.
Argilite calcaire (Shales)

Illustration : Analyse chimique, tableau 7.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé dans l'excavation qui fut creusée pour asseoir les fondations des nouveaux bâtiments de l'Ecole Natio-

nale de Géologie, à Nancy. Sous une terrasse de la Meurthe de 8 mètres d'épaisseur, une argile bleue ayant la texture des shales fut mise au jour. L'effervescence est très faible, la roche est bleue et non consolidée. Un puits de reconnaissance de 1 mètre ne montra pas de banc calcaire. Le niveau géologique fut déterminé par l'examen de quelques petites ammonites pyriteuses : Amaltheus margaritatus, Montfort, var. loevis, Quent. et var. depressus, Quent. furent déterminées (324 et 317). Cet argument paléontologique concorde avec l'allure du faciès et les considérations géométriques sur le sous-sol de Nancy et permet de dater ce niveau du Domérien inférieur : zone à Am. margaritatus. Il s'agit du même niveau que celui qui est exploité à Jeandelaincourt (BRACONNIER, 33; TERQUEM et PIETTE, 357; TERQUEM et BERTHELIN, 358; JOLY, 188; CORROY, 73; GERARD et TETRY, 119).

Le milieu de genèse est marin et le caractère de la mer peut être précisé par les arguments paléontologiques (119). La mer est calme et profonde.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est un shale, c'est-à-dire que la masse de l'argile apparaît litée, ce qui fait qu'en séchant elle se casse en petites plaques. Elle est gris-bleu et paraît homogène sauf quelques taches ocreuses dues à l'oxydation des concrétions pyriteuses.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une Argilite à peu près uniquement constituée d'une matière argileuse faiblement biréfringente dans les teintes du premier ordre. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques, cryptocristallines et homogènes. Sur un fond isotrope une multitude de paillettes aux contours indécis qui définissent la texture cryptocristalline des argiles se révèlent.

Les grains de carbonates rhomboédriques (5 μ) sont très rares. Les grains de quartz sont très rares également : 2 ou 3 par champ au grossissement 200. Leurs diamètres extrêmes vont de quelques μ à 10 μ . La moyenne se trouve vers 5 μ . Ils ont une forme en éclat et sont fort dispersés. De ci, de là, apparaissent (2 ou 3 par champ) des paillettes de mica de 10 à 20 μ de long, qui doivent correspondre à l'apport détritique sans qu'on puisse l'affirmer. Il est admis en effet que la taille des micas détritiques est environ 3 fois le diamètre des quartz qui leur correspondent. La pyrite et le rutile sont visibles ainsi que quelques grains de limonite mais l'imprégnation ferrugineuse est faible.

Le lavage de l'Argilite n'a révélé que des Ammonites pyriteuses déterminables, à l'exclusion de tout autre débris.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 11,6 % de Calcite et pas de Dolomite; 1,8 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; enfin, 0,45 % de Pyrite. Le pH de la roche est 7,2.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation peuvent être comprises comme celles d'une vase peu calcaire où un milieu réducteur permet le développement abondant des sulfures de fer. Les diagrammes de Rayons X permettent de donner les renseignements suivants :

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une solution dispersée à l'ammoniaque. 13,72 m — Ombres entre 13,72 et 9,82 avec épaisissements aux environs de 13 et de 11 — 9,82 AF — 7,2 F — 5 m — 4,70 f — 4,27 F — 3,33 F. Ces lignes indiquent la coexistence de minéraux du groupe de l'Hydrobiotite, de la Chlorite, de l'Illite peut-être hydratée pour une part et de la Kaolinite. La raie à 7 A° paraît dominer les autres mais le rassemblement par chauffage de tous les minéraux micacés à 10 A° montre que leur ensemble est au moins aussi abondant. Ceci est confirmé par la comparaison des raies à 3,58 et à 3,33 qui sont à peu près aussi intenses. Au total, on considère que la Kaolinite représente 50 % du mélange par rapport à l'ensemble des minéraux micacés.

Le deuxième spectre a été fait à partir d'une plaquette traitée au glycérol. Elle révèle les raies à 10 — 7 — 5 — 4,27 — 3,58 et 3,34 A° avec les mêmes relations d'intensité; on remarque un flou central important entre 10 et 14 A°. Les raies de la Montmorillonite glycérolée n'apparaissent pas.

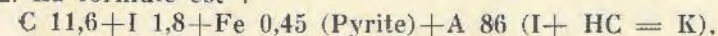
Le troisième spectre a été fait sur la même poudre que le précédent mais non glycérolée. Les résultats en sont identiques, ce qui confirme que la ligne à 14 A° n'est pas à attribuer à la Montmorillonite.

Le quatrième spectre a été fait sur une poudre, a) traitée à l'acétate de Na et chlorure de Ca, b) séchée au benzène, c) chauffée à 500°. La ligne à 14 A° n'est pas visible sur un spectre de poudre. Par contre une ligne à 7 A° affaiblie prouve la présence de la Chlorite. La ligne à 10 A° gagne en intensité par écrasement de l'Hydrobiotite.

L'analyse chimique qui se trouve au tableau n° 7 montre les résultats suivants : le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 4,35$. La proportion de potasse et de magnésie est de 4,55 et 2,80, par rapport à 100 grammes de silicate déshydraté.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation correspondent à une vase peu calcaire mais sulfureuse. Le pH est 7,2. La formule est :



— 8 et 9 —

CHARMONTHIEN
JEANDELAINCOURT (Meurthe-et-Moselle)
Marne et calcaire argileux

Illustration : Microphoto : planche II, fig. 3.

Analyse chimique : tableau n° 7.

Analyse thermique : figure n° 9, courbe V.

Rayons X : planche IV, fig. 1, 2, 3 et 4.

1° GITE ET STRATIGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans la grande marnière de Jeandelaincourt (M.-et-M.), située à 22 km. au Nord de Nancy, non loin de la route Nancy-Nomeny. Cette carrière a été décrite en détail par GERARD et TETRY (119). Le prélèvement a été effectué dans les marnes bleues d'une épaisseur de 20 mètres qui appartiennent à la partie supérieure de la zone à *Amaltheus margaritatus*. Au milieu de ces marnes se trouvent des nodules calcaires. D'autre part on ramasse dans la carrière de très grandes plaques calcaires dont la surface est couverte d'une quantité considérable de fossiles de toutes sortes. Un échantillon de ces plaques a été prélevé pour être étudié avec la marne, et révéler les différences. Sa description est intéressante dès maintenant.

La face supérieure de la plaque est formée d'une marne calcaire qui passe insensiblement à la marne typique de la carrière. La proportion de CO_3Ca augmente régulièrement au fur et à mesure qu'on se rapproche de la surface, la pâte reste bleue et sans traces organiques. A quelques centimètres de la plaque la section de celle-ci montre des débris d'organismes entremêlés dans la substance rocheuse. Leur quantité augmente jusqu'à ce qu'ils forment la roche elle-même. On parvient alors à la surface de ces dalles qui est complètement recouverte de fossiles dont la majorité est en bon état. C'est ainsi que des épisodes beaucoup plus riches en organismes ont mar-

qué la sédimentation au cours du Charmoutien dans cette région.

Un essai de reconstitution des caractéristiques du milieu a été tenté par GERARD et TETRY (119) : Pendant la sédimentation des marnes de la zone Am. margaritatus la mer est relativement profonde et calme. La vie des organismes est difficile dans un milieu assez pauvre en calcaire, et fortement réducteur. Les animaux qui y vivent sont en assez bon état de conservation. Les plaques calcaires correspondent au contraire à des périodes où le fond se relevait. Au fur et à mesure de cet amincissement de la couche d'eau, la sédimentation devenait plus calcaire. Puis apparaissent en même temps les organismes et les courants. Les seconds de plus en plus forts, détruisent les premiers de plus en plus nombreux. Le dernier épisode est marqué par la mort de nombreux fossiles qui sont pris dans ce fond calcaire. Aussitôt que la mer s'élève la sédimentation marneuse se rétablit, cachant les restes bien conservés de toute la faune qui pullulait avant son retour.

Un tel tableau coordonne très bien les faits d'observations; il ne constitue bien entendu qu'une histoire hypothétique mais vraisemblable. Les deux échantillons de la marne et du banc calcaire ont été étudiés par la pétrographie afin de vérifier si ces données coïncident avec celles que l'on tire de la stratigraphie et de la paléontologie.

2° DESCRIPTION MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche de Jeandelaincourt est un shales marneux. Quand la roche est en place elle apparaît en petites plaquettes tendres et bleues comme celle de Nancy ou de Gérardcourt. On remarque dans la roche des fossiles souvent pyriteux et de très grands cristaux de gypse néoformés translucides et développant leurs faces cristallographiques. La plaque calcaire a déjà été décrite.

Au microscope la description de la marne et de la dalle calcaire sera séparée.

a) *Marne*. — On doit signaler des sphérules de marcassite dans la roche. Deux d'entre elles ont 300 μ de diamètre, les autres une quinzaine. On voit quelques agrégats de limonite. Du gypse provenant de l'oxydation des pyrites apparaît en grands cristaux maclés. Quelques débris de coquilles informes voisinent avec un morceau de têt d'Echinoderme dont le réseau est épigénisé en pyrite.

Le lavage de la marne a donné le résultat suivant :

Parmi les Invertébrés : petit Turbo, Radioles d'Oursins, plaques d'Echinodermes, articles de Crinoïdes, valves d'Ostracodes. Parmi les Foraminifères : *Nodosaria*, *Marginulina*, *Dentalina*, *Robulus*. Parmi les éléments minéraux, quelques quartz, des cristaux de

gypse, quelques morceaux de marne non désagrégés et un grand nombre de concrétions pyriteuses.

b) *Calcaire*. — L'aspect général est celui d'un calcaire. La phase argileuse est masquée. La texture homogène est formée par l'accumulation de grains de calcite extrêmement fins (2 μ environ). La plaque mince a été taillée perpendiculairement à la surface du banc calcaire à quelques centimètres de celle-ci. Elle montre un niveau formé de débris de coquilles entre deux parties azoïques. Ceci correspond à un microcycle de sédimentation et sans doute à une « saison » agitée où des débris organiques ont été accumulés. Ces débris organiques sont broyés et disposés en désordre. On peut voir des morceaux de têt de Foraminifères, de coquilles, mais surtout de nombreux débris d'Echinodermes (planche II, figure 3) dont un article de Crinoïde coupé parallèlement à son axe. Ce microfaciès qui correspond à un milieu calcaire agité, précise les indications de l'examen microscopique. Les grains de quartz sont très peu nombreux. Le délitage de la roche dans l'eau n'est pas possible et n'a pas permis son lavage.

3° ANALYSE DES ROCHES.

a) *Marne*. — La marne de Jeandelaincourt contient 9,6 % de Calcaire et pas de Dolomite; 3 % de Gypse et 1,68 % de Fer exprimé en Pyrite; 3% de produits insolubles. Le pH est de 7,5.

b) *Calcaire*. — Le Calcaire contient 78 % de Calcaire et pas de Dolomite (0,88 % de MgO). Pas de sels solubles, 0,6 % de produits insolubles, 2,86 % de Fer exprimé en Pyrite. Le pH de la roche est 8,1.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

La discussion de l'analyse aux Rayons X de la phase argileuse extraite de la marne, a été faite précédemment à titre d'exemple, page 101. La conclusion de ces essais, particulièrement nombreux, est la suivante : le mélange de minéraux contient 50 % de Kaolinite et les minéraux micacés sont répartis entre l'Illite, la Chlorite et l'Hydrobiotite, le premier minéral dominant les seconds.

La phase argileuse extraite du calcaire marneux est très semblable; le spectre de Rayons X a été fait sur un plaquette sédimentée à partir d'une suspension à l'ammoniaque. Le calcul des espaces a donné le résultat suivant : 14,2.f et floue — ombre entre 14 et 10 — 10.AF — 7.1.TF — 5.m — 4,70.f — 4,27.f et circulaire — 3.59. TF — 3.35. F — L'analyse thermique a été faite sur la phase argileuse extraite de la marne. Son résultat est représenté fig. 9, courbe V et il est interprété page 120. Le crochet de la

Kaolinite est très vigoureux, si bien que l'illite se révèle avec peine par un méplat précédent la chute brusque due à la Kaolinite. L'analyse chimique dont le résultat est donné au tableau n° 7 montre un

rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,38$. Les proportions de potasse et de magnésie sont de 3,42 et 2,20. Ces chiffres montrent la part importante de la Kaolinite dans le mélange.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase marine très pyriteuse. Très peu calcaire dans un cas, et très calcaire dans l'autre; les pH sont de 7,5 et 8,1.

Les formules caractéristiques de ces roches sont :

Marne : C 9,6 + I 1,3 + Gypse 3 + Fer 1,68 (Pyrite) + A 84 (I + HC = K).
Calcaire : C 78 + I 0,6 + Fer 2,86 (Pyrite) + A 18 (I + HC > K).

— 10 —

TOARCIEN
NANCY (Magasins Réunis)
Schiste carton

Illustration : Analyse chimique, tableau 7.

1° GÉNÉRALITÉS SUR LE TOARCIEN DES ENVIRONS DE NANCY.

Le Lias supérieur continue une sédimentation marneuse grossièrement analogue à celle du Lias moyen et supérieur, mais assez variée dans sa succession. C'est pourquoi divers affleurements ont été étudiés. Le Toarcien débute après le dépôt des grès médioliasiques du Domérien supérieur par une série extrêmement variable qui marque les hésitations de la sédimentation, prolongation du faciès sableux, lacunes, bone beds, etc. (MAUBEUGE, 274). Ensuite s'installe le faciès des schistes cartons (FABER, 104). Ce faciès n'est pas exclusif du Toarcien inférieur (CORROY, 73) mais est cependant très général à ce niveau. Il commence déjà dans la zone à Harpoceras falseiferum pour se poursuivre dans la zone à Harpoceras bifrons. La sédimentation est alors troublée avec dépôts de nodules phosphatés (BLEICHER, 28). Puis la sédimentation marneuse s'ins-

talle jusqu'à la fin du Toarcien, sur 35 mètres d'épaisseur (CORROY et GERARD, 78). La base de ces marnes supérieures est formée de marne ferrugineuse sur quelques décimètres, puis le faciès des marnes bleues liasiques se réinstalle, sur toute l'épaisseur. Ces marnes bleues contiennent des nodules calcaires très disséminés dans la partie inférieure, plus répandus dans la partie moyenne et très abondants dans la partie supérieure (78).

Des échantillons ont été prélevés dans les schistes cartons à Nancy, dans le niveau immédiatement supérieur à ceux-ci, à Ludres, et enfin dans les marnes à nodules, à Champigneulle.

2° SCHISTE CARTON. GITE ET PALÉOGRAPHIE.

Les schistes cartons ont été prélevés dans les caves des Magasins Réunis, à Nancy, où ils sont à nu. Ils y montrent un phénomène qui a été analysé par JOLY et NINCK (189). La pyrite, sous l'influence de l'oxygène de l'air, s'oxyde en sulfate de fer qui, par double décomposition avec la CO_3Ca , donne du gypse cristallisé. Le tout se fait avec augmentation de volume et occasionne de gros dégâts. Le milieu de sédimentation est marin et les caractéristiques de la mer peuvent être précisées (FABER, 104). La mer était de faible profondeur, peu agitée et riche en mollusques caractérisant des fonds peu profonds. Il s'y formait en même temps qu'une vase argilo-calcaire, une boue sapropélique qui est restée incluse dans la roche et la rend bitumineuse. Toute une étude soignée de FABER, sur les schistes bitumineux du Luxembourg, démontre cette hypothèse qu'on peut étendre à la Lorraine, en l'atténuant car le faciès bitumineux est beaucoup moins épais à Nancy que dans le Luxembourg et moins riche en matières volatiles.

3° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Quand le schiste carton peut être vu en place à une assez grande profondeur, il est presque massif et d'une teinte bleu-noire. Dès qu'on se rapproche de la surface, il se délite en plaques qui peuvent être de plusieurs décimètres carrés et cet aspect en feuille cartonnée s'accroît au fur et à mesure que l'altération augmente. Le gypse qui se forme par l'altération des pyrites est responsable de cet aspect car il se loge dans les joints de la roche et sa formation, qui se fait avec augmentation de volume, les fait bâiller. En même temps que l'altération se prononce, la couleur s'éclaircit et le schiste devient ocre, le fer de la pyrite est libéré. Le terme de schiste est consacré par l'usage mais il n'est pas ici très légitime; il s'agit d'un shales marneux et bitumineux dont le délit est très régulier.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une marne pauvre

en calcaire et tachée de plaques brunes. La texture normale à la stratification est litée et sur les roches altérées le gypse se manifeste en bandes dans les joints. La texture parallèle est homogène. Le fond argileux n'est pas masqué et il apparaît crypto cristallin, surtout sur les biseaux de la lame.

Les cristaux de calcite sont petits (5 μ) et n'ont pas de forme cristalline. Ils sont disséminés. Les grains de quartz sont en forme d'éclats, ils varient de 5 à 20 μ et sont donc petits. Le diamètre moyen est 10 μ . Ils sont complètement dispersés.

La roche contient de nombreux sphérules de pyrite. Quand elle est altérée, la couleur brune s'intensifie et l'on voit des plages brunes entourant ces grains de pyrites. L'altération de celle-ci libère le fer sous forme de sesquioxides. Le gypse n'est visible qu'en section normale à la stratification. Enfin, on remarque de nombreux débris d'algues qui apparaissent sous forme de baguettes noires montrant parfois des alignements de cellules. Elles sont identiques à celles qui furent décrites par DREYFUSS (96, 99). Par contre, les corps discoïdes décrits dans les schistes à Posidonomyes de Franche-Comté ne semblent pas être présents. La matière bitumineuse est diffuse dans la section mince qui s'éclaircit quand on la chauffe. Le lavage n'a pas été possible car la roche ne fait pas boue avec l'eau.

4° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 15 % de Calcite et pas de Dolomite; 1,1 % d'insolubles et 7,4 % de Gypse; 3,5 % de matières volatiles bitumineuses et 0,92 % de Pyrite. Le pH est 7,8.

5° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation apparaissent comme celles d'une vase organique assez peu calcaire et où les caractéristiques du milieu ont permis le développement de sulfures abondants. Les diagrammes de Rayons X permettent de donner les renseignements suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14,2.f. floue — ombres entre 14 et 9,9 — 9,9.F — 7,1.F — 5.m — 4,70.ttf — 4,27.m et circulaire — 3,58.F — 3,35.F. Ces lignes montrent la coexistence des minéraux des groupes de l'Hydrobiotite, de la Chlorite, de l'Illite peut-être hydratée pour une part, et de la Kaolinite. La proportion de celle-ci peut atteindre 50 % du mélange par rapport à l'ensemble des minéraux micacés.

L'analyse chimique représentée au tableau n° 7 montre que le

rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 4,46$. Les proportions de potasse et de magnésie sont de 3,66 et 1,76 % de silicate déshydraté.

6° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase peu calcaire, riche en matières organiques et en sulfures. Le pH est 7,8. La formule est :

C 15 + I 1,1 + Gypse 7,4 + Bitume 3,5 + Fe 0,92 (Pyrite) + A 72 (I + HC = K).

— 11 —

TOARCIEN
LUDRES (Meurthe-et-Moselle)
Marne

Illustration : Analyse thermique figure 9, courbe IV.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans une excavation qui se trouve au pied du plan incliné de l'ancienne mine de fer de Ludres. Il correspond à un niveau qui se trouve 10 mètres au-dessus des schistes cartons, comme le montre un puits fait à 40 mètres de là dans le talus de la route. Il s'agit donc de la partie inférieure des marnes à ovoïdes calcaires du Toarcien. Le milieu est marin et ses caractéristiques sont possibles à reconstituer (78). La mer est peu profonde et ne dépassait sans doute pas 30 à 40 mètres.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'échantillon est légèrement altéré car il a été prélevé près de l'affleurement. C'est pourquoi sa couleur beige est sans doute plus claire que celle de la roche profonde. En place, cette roche a l'aspect d'un shales mais quand elle est humide, elle perd rapidement sa structure si on la touche; elle est donc plastique. On remarque des traînées ferrugineuses dans sa masse.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une marne où la calcite masque en grande partie la matière argileuse. La texture normale à la stratification montre de minces petits lits de calcite paral-

lèles à celle-ci. Il ne semble pas qu'ils soient développés par altération. La texture parallèle à la stratification est homogène. La phase argileuse sur les biseaux de la lame est bien visible, elle est presque entièrement amorphe et un peu floconneuse.

La calcite se partage en deux lots. Le premier est formé de grains isolés ayant souvent la forme rhomboédrique de quelques μ de diamètre et dispersés dans le champ. Le second lot est formé de calcite en trainées déjà signalées. Ces trainées peuvent avoir 10 μ de large et 100 de long ou 40 μ de large et 1 mm de long. Toutes ces trainées sont parallèles. Le polissage n'en est pas responsable car les stries qui lui sont dues sont obliques par rapport au plan de sédimentation. Quand la plaque devient plus épaisse, la calcite fortement biréfringente semble dominer, puis elle occupe tout le champ en masquant la matière argileuse.

Les grains de quartz ont la forme d'éclats irréguliers; les diamètres varient entre 5 et 20 μ , la grosse majorité est fine, aux environs de 5 μ . Leur répartition est irrégulière et leur fréquence est faible. Les minéraux accessoires qui sont visibles sont au tout premier rang, la limonite très abondante. On voit quelques débris d'algues planctoniques.

Le lavage de la marne n'a pas donné de microfaune, sauf quelques articles d'encrines parmi d'innombrables débris de lamelli-branches.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 21 % de Calcite et pas de Dolomite, non plus que d'insolubles ni de sels solubles. Par contre, 1,16 % de sesquioxides de fer ont été dosés. Le pH est 7,7.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

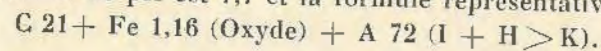
Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilo-calcaire. On ne peut rien préciser de mieux, en l'absence de tout élément figuré démonstratif. Le diagramme des Rayons X donne les renseignements suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14.tf et floue — ombres entre 14 et 10 — 10.F — 7,2.TF — 5.m — 3,60.TF — 3,34.F. Ces lignes montrent la présence d'Illite et de Kaolinite. L'ombre qui existe à l'intérieur des accolades à 10 A° avec une limite assez nette vers 14 A°, doit représenter une légère proportion d'hydrobiotite. De toute façon, l'Illite est vraisemblablement hydratée pour une part. La proportion de Kaolinite est évaluée à 40 % par rapport au total des minéraux micacés.

L'analyse thermique a été dépouillée page 120. On voit sur la courbe de la figure 9 l'importance de la Kaolinite. Le crochet à 480° de l'Illite est beaucoup moins accusé que celui de la Kaolinite sur le minéral pur. C'est pourquoi dans un mélange ce crochet reste très discret et ne forme qu'un méplat qui précède le pic de la Kaolinite.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin. Les conditions de sédimentation ne sont pas possibles à préciser sinon qu'il s'agit d'une boue argilo-calcaire. Le pH est 7,7 et la formule représentative est :



— 12 et 13 —

TOARCIEN

CHAMPIGNEULLES (Meurthe-et-Moselle)

Marne et Nodule Calcaire

*Illustration : Analyse chimique tableau 7.
Analyse thermique figure 9, courbe III.
Spectre planche IV, figure 9.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans la marnière de Champigneulles. A 4 km. au Nord de Nancy, une tuilerie exploite les marnes près de la route, un peu au delà de l'usine. L'exploitation montre sous les éboulis de la côte bajocienne et les faciès d'altération, une belle marne bleue emballant des nodules calcaires volumineux de 1 à plusieurs décimètres. Ce sont ces deux types de roches qui ont été étudiés. Le niveau est situé dans la moitié supérieure du Toarcien marneux. Le milieu est marin et les caractéristiques de cette mer peuvent être reconstituées. CORROY et GERARD (78) y consacrent une étude fort suggestive : la présence de gastéropodes herbivores, Trochus, Turbo, Cérithium montre qu'on ne devait pas se trouver sous la zone des Laminaires. Les genres Arca, Lucina, Leda, Nucula, Astarte, Avicula vivent volontiers entre 10 et 60 mètres de fond. Enfin, les Pleurotomaires sont absents, alors qu'ils vivent actuellement à plus de 55 mètres et étaient très abondants dans les mers charmouthiennes que l'on a décrites profondes. Et CORROY et GERARD concluent : « Ainsi la mer toarcienne de Lorraine nous apparaît bien comme une mer peu profonde déposant des forma-

tions vaseuses, sous une tranche d'eau qui ne devait pas dépasser 30 à 40 mètres. » L'étude pétrographique doit être confrontée à de telles reconstitutions et préciser les conditions de sédimentation utiles à connaître pour l'étude de la phase argileuse en elle-même.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

a) *Marne de Champigneulles*. — L'échantillon est une marne plastique bleue parsemée de petites lamelles ressemblant à la muscovite. Les fossiles y sont assez rares.

Au microscope, l'aspect est celui d'une marne typique où la calcite n'est pas assez abondante pour masquer la phase argileuse. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et homogènes. La phase argileuse, bien visible dans les biseaux de la section mince, est presque isotrope et apparaît floconneuse, c'est-à-dire que la nature argileuse qui fait tout le fond des préparations est réunie en certains endroits en masses sphériques de 40 à 80 μ qui paraissent isotropes. La calcite semble respecter ces zones et ses petits cristaux s'éclairent isolément dans le fond argileux situé entre les sphérules. Cette calcite se trouve soit en petits cristaux isolés (5 μ) dont les formes rhomboédriques sont rares, soit en agrégats plus importants. Ces agrégats peuvent avoir 20 à 40 μ .

Les cristaux de quartz sont de forme irrégulière. Le diamètre varie entre quelques μ et 40 μ . La majorité a 20 μ . Leur répartition est irrégulière et leur fréquence faible. Le minéral accessoire de beaucoup le plus abondant est la pyrite en petits globules. On trouve dans la plaque mince une sphère de marcassite rayonnée de 50 μ .

Le lavage de la marne a donné une faune extrêmement maigre où la seule espèce qu'on peut caractériser est une *Involutina*. Terq. Les minéraux en grains montrent immédiatement la présence de nombreux agrégats pyriteux formés d'une multitude de petits cristaux cubiques. Ces cristallisations sont mêlées à de très nombreuses paillettes de muscovite, ainsi qu'à des cristaux de calcite en agrégats.

b) *Nodule calcaire*. — Les nodules calcaires de la manière de Champigneulles sont ovoïdes. Ils sont souvent creux et leur cavité est alors recouverte de calcite cristallisée. Quelques-uns sont fossilifères. Leur couleur est gris-bleu, analogue à celle de la marne à laquelle ils passent insensiblement. Le délitage du shale se prolonge dans leur masse à la périphérie. Ils sont fréquemment parcourus de fissures remplies de calcite cristallisée. Ces nodules sont alignés dans le plan de la sédimentation, ce qui est très mal visible dans cette exploitation, en raison des glissements et éboulements.

L'aspect microscopique est celui d'un calcaire en mosaïque dont les éléments sont d'une grande régularité et ont 5 à 10 μ de diamètre.

La texture est très homogène. La phase argileuse est complètement masquée. Les quartz sont sensiblement plus nombreux et plus gros que dans la marne. Ils vont de 10 à 60 μ , la taille la plus fréquente est de 40 μ . S'il se révélait constant, ce détail serait à ajouter à la liste des documents qu'on possède sur ces nodules et qui ne permettent encore pas de se faire une idée très précise du mode de leur formation (BRACONNIER, 33; BLEICHER, 25, 28; Bibliographie dans TWENHOFEL, 367). Aucune trace organique n'est visible. La roche ne se délitage pas dans l'eau et n'a pas pu être lavée.

3° ANALYSE DES ROCHES.

La marne contient 11 % de Carbonate et pas de Dolomite; 2,4 % d'insolubles et 5,3 % de Muscovite 0,86 % de Pyrite. Le pH est 7,7.

Le Calcaire contient 72 % de Calcite et pas de Dolomite; 6,2 % d'insolubles et 0,92 % de Pyrite. Le pH est 8,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les roches de Champigneulles sont des dépôts peu profonds et vaseux. Le milieu réducteur qui règne dans les vases favorisa la formation des sulfures. Il est probable qu'on a ici l'un des équivalents les plus typiques des boues bleues des mers actuelles. Les diagrammes de Rayons X permettent de donner les résultats suivants :

Le premier spectre concerne la marne de Champigneulles et a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14.tf et floue — ombres entre 14 et 10 — 10.F — 7,2.F — 5.m — 3,59.AF — 3,35.F — Ces lignes indiquent un mélange d'illite probablement hydratée pour une part, de Kaolinite et sans doute d'une petite fraction d'Hydrobiotite. La proportion de Kaolinite dans le mélange est évaluée à 40 % par rapport à l'ensemble des minéraux micacés (pl. IV, 9).

Le deuxième spectre concerne le nodule calcaire de Champigneulles. Il a été préparé dans les mêmes conditions. Ombres entre 14 et 10 A° avec une limite assez nette du côté des 14 A° — 10.F — 7,1.TF — 5.f — 4,27.m — 3,58.F — 3,34.F. La même association peut être décrite avec 40 % de Kaolinite.

L'analyse thermique montre un méplat endothermique à 480° et un crochet endothermique à 530°. On vérifie ainsi la présence de la Kaolinite et le fait que la raie à 7 A° n'est pas un harmonique d'une raie à 14 A°, mais bien caractéristique de la Kaolinite.

L'analyse chimique a été faite sur l'échantillon marneux. Le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,32$; la proportion de potasse et de magnésie est de 4,81 et de 2,57 % de silicate déshydraté.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est un milieu marin de plate-forme continentale peu profond. Les conditions de sédimentation sont pour la marne, celles d'une vase peu calcaire et très sulfureuse. Le pH est 7,7 et 8,8. Les formules représentatives sont :

C 11 + I 2,4 + Muscovite 5,3 + Fe 0,86 (Pyrite) + A 80 (I + H > K).
C 72 + I 2,6 + Fe 0,92 (Pyrite) + A 25 (I + H > K).

— 14 —

CALLOVIEN LIFFOL-LE-GRAND (Vosges) Marne

Illustration : Analyse thermique figure 9, courbe 1.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé au sommet d'une carrière ouverte dans le Bathonien supérieur à l'Est de Fréville qui n'est pas loin de Liffol-le-Grand. Cette carrière fut décrite par CORROY (76). La dalle oolitique du Bathonien est exploitée, elle se termine par une surface ferrugineuse et taraudée, couverte de grandes huîtres. Au-dessus viennent 2 m. 50 de marnes qui deviendront insensiblement rocailleuses et qui représentent la base de la zone à Macrocephalites macrocephalus (Sch). Ce niveau correspond à un brusque affaissement du fond de la mer après la sédimentation oolitique de haut-fond du Bathonien et la semi-émersion qui la termine. Le milieu de sédimentation, qui est marin, peut être précisé (76). Les fossiles trouvés sont des Ammonites qui n'indiquent rien, des Lamellibranches (Gryphea, Ostrea), des Brachiopodes (Zeilleria) et des Serpules. D'autre part, la roche est assez calcaire et dure, elle contient de nombreux débris d'organismes. On est donc dans une zone encore agitée par les vagues, dans une mer peu profonde (BRACONNIER,

33; CORROY, 73, 76; HAUG, 166; JOLY, 190; NICKLES, 307-308, WOHLGEMUTH, 391-392).

2° EXAMENS MACRO ET MICROSCOPIQUES.

La roche consiste en une alternance tous les centimètres de petites plaques amygdalaires grumeleuses et d'une marne plus plastique. Le débit n'est pas régulier et le toucher est grossier. La couleur est gris clair.

Au microscope : l'allure est celle d'un calcaire. La texture est très détritique et la roche paraît pétrie d'organismes broyés. La phase argileuse est masquée. La calcite forme à la fois le fond de la roche et les débris d'organismes. La calcite qui forme la pâte est formée d'une mosaïque de grains extrêmement fins de quelques μ . Le quartz est assez abondant. La forme des grains est toujours irrégulière, la taille est assez grande, de 10 à 120 μ . La taille la plus fréquente est 60 μ ce qui est déjà important. On ne voit pas de minéral accessoire sauf une imprégnation et quelques concrétions limonitiques. Les organismes visibles en plaques minces sont : Textularia — loges de Foraminifères disloquées — débris de coquilles de mollusques et fragments de Lithothamnées.

Le lavage de la marne a donné des grains de quartz, de très nombreuses oolites calcaires, des petits Gastéropodes analogues à des Ptéroccères, des fragments de radioles et de têtes de Crinoïdes. Pas de Foraminifères en bon état.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 48,5 % de Calcite et pas de Dolomite (Mg 0,32 %); 7,6 % de quartz et pas de sels solubles dans l'eau. 0,92 de sesquioxyde de fer. Le pH de la roche est 8,1.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

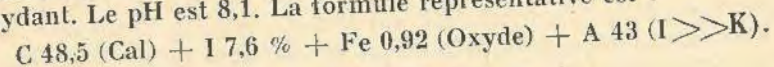
Les conditions de sédimentation de cette roche peuvent être comprises comme celles d'une boue argilo-calcaire, très agitée et détritique, assez proche d'un littoral. Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants : le spectre a été fait sur une plaque sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque : ombre entre 14 et 10 plus intense en se rapprochant de 10 Å — 10.TF — 7,1.TF — 5.AF — 3,59.F — 3,33.TF. Ces lignes indiquent un mélange de l'illite et de Kaolinite. L'illite est vraisemblablement hydratée pour une part. Il est possible qu'une petite fraction d'Hydrobiotite soit présente dans le mélange par comparaison avec les autres échantillons. La proportion de Kaolinite est

évaluée à 30 % maximum par rapport à la somme des minéraux micacés.

L'analyse thermique a déjà été interprétée page 120. La courbe représentée figure 9, courbe I, montre une inflexion à 480° qui caractérise l'Illite. Une autre la suit, qui est due en majeure partie à la Kaolinite, sans qu'on sache si celle-ci ne reprend pas en l'augmentant beaucoup le deuxième crochet endothermique qu'on trouve dans certaines Illites. Cette courbe confirme l'examen aux Rayons X qui donne un mélange Illite-Kaolinite. Les différences d'intensité des deux crochets obtenus à partir des minéraux purs, permet de croire que l'Illite est dominante dans un tel mélange.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est marin et littoral. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilo-calcaire agitée en milieu oxydant. Le pH est 8,1. La formule représentative est :



— 15 —

OXFORDIEN INFÉRIEUR LA SEIGNE par LES FONTENELLES (Doubs) Marne bleue

Illustration : Analyse chimique tableau 7.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cette marne a été prélevée au flanc d'une colline au Sud-Ouest de la Combe de St-Julien. Le lieu-dit est La Seigne, près du village de Fontenelles, à 10 kilomètres au Sud de Maiche (Doubs). La marne est bleue et contient des petites Ammonites pyriteuses où *Quenstedticeras Mariae* d'Orb. et *Praecordatum* R. Douv. et *Creniceras Renggeri* (Opp) ont été déterminés. On se trouve ici dans l'Oxfordien inférieur mais dans sa partie supérieure. Les affleurements montrent à cet endroit une marne plastique et bleue. Il n'y a pas de niveau calcaire. La sédimentation paraît tranquille et les fossiles ne sont pas brisés. Le milieu de sédimentation qui est marin devait être celui de la zone profonde de la plate-forme continentale, inférieure à la zone agitée et représentant une sédimentation calme et vaseuse.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est un shale très fin. L'aspect est celui d'une marne bleue très plastique quand elle est humide. On ne voit ni grumeaux ni caractéristiques spéciales à l'œil nu.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une marne où la calcite domine fortement les autres phases. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et homogènes. La phase argileuse n'est visible que sur les biseaux de la préparation; elle paraît floconneuse mais l'abondance des petits cristaux de calcite qui illuminent le fond isotrope rend l'observation difficile. Cette calcite se trouve en grains libres les uns vis-à-vis des autres. La taille varie de 5 à 40 μ ; la plus fréquente est voisine de 20 μ .

Les quartz sont rares et dispersés. Leur forme est celle d'éclats irréguliers. La taille varie de 5 à 40 μ . La plus fréquente est vers 20 μ . On ne voit aucune trace d'organismes. Le seul minéral accessible saillant est constitué par de la pyrite en petits sphérules et par de la magnétite en forme de croûte.

Le lavage de la marne a donné *Textularia*, *Robulus*, *Marginulina*, *Fronicularia*, Valves d'Ostracodes. Parmi de fins débris de coquilles, les minéraux en grains sont des morceaux de roches, des agrégats de calcite et des concrétions pyriteuses.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 38 % de Carbonate de chaux et pas de Dolomite (0,12 % de MgO); 2,5 % de produits insolubles mais pas de sels solubles dans l'eau; 0,78 % de fer sous forme de pyrite. Le pH est 7,4.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

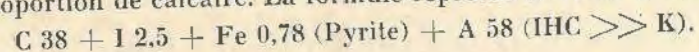
Les conditions de sédimentation peuvent être comprises comme celles d'une vase bleue très calcaire où des réactions anaérobies ont favorisé la genèse des sulfures. Le diagramme des Rayons X donne les renseignements suivants : le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 14.f et floue — ombre entre 14 et 9,85 — 9,85.F — 7,06.F — 5.AF — 4,70.tf — 4,27.f et circulaire — 3,58.AF — 3,33.F. Ces lignes indiquent la présence dans le mélange d'Illite, de Chlorite et de Kaolinite. La proportion de Kaolinite a été évaluée à 30 % du mélange par rapport à la somme des minéraux micacés.

L'analyse chimique, qui est figurée au tableau n° 7, indique un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 5,77$ ainsi que 5,01 de potasse et 6,98 de magnésie,

par rapport à 100 grammes de silicate déshydraté. On ne peut attribuer cette magnésie à une attaque insuffisante ayant laissé des traces de Dolomite. Les raies de celle-ci n'apparaissent pas dans le spectre. Il faut donc considérer qu'elle se trouve sous forme silicatée.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase très calcaire et sulfureuse. Le pH est 7,4 malgré la forte proportion de calcaire. La formule représentative de la roche est :



— 16 et 17 —

OXFORDIEN
ÉCROUVES (Meurthe-et-Moselle)
Marne et Calcaire marneux

Illustration : Analyse chimique tableau 7.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Ces échantillons ont été prélevés dans une marnière qui se trouve près du village d'Ecrouves, sous la route, au bord du canal. Elle est exploitée par la cimenterie de Pagny-sur-Meuse, à quelques kilomètres à l'Ouest de Toul. La carrière montre une alternance de marnes et de calcaires argileux dont la différence de nature est visible sur le front de taille mais pas assez sensible pour qu'elle soit facile à distinguer sur des échantillons isolés. Une faune assez nombreuse peut être recueillie, où l'on trouve Lamellibranches, débris d'Echinodermes, Brachiopodes et de petites Ammonites pyriteuses. J'ai déterminé *Cosmoceras ornatum* (Schl), *Belemnites hastatus* Blainv. et M. MAUBEUGE m'a déterminé *Horioceras baugieri* (d'Orb.). Ces fossiles indiquent qu'on se trouve dans l'Oxfordien inférieur qui se trouve encore dans la région de Toul, sous le faciès marneux des Vosges, avant de passer à la gaize de la Meuse. Le

milieu de genèse est marin et les caractéristiques de cette mer peuvent être précisées. Les genres *Gryphea*, *Arca*, *Nucula*, *Pecten*, habitent à une certaine profondeur en fond vaseux. On retrouve ici des conditions voisines de celles du Charmouthien. Là aussi la sédimentation est régulière, les fossiles ne sont pas brisés. On est donc hors d'atteinte de l'agitation superficielle des eaux. C'est une mer d'une profondeur de plusieurs dizaines de mètres. Ces données doivent être confrontées à celles de la pétrographie. (BRACONNIER, 33; WOLFGEMUTH, 393; NICKLES, 307; JOLY, 190; CORROY, 73, 76; DESCHASEAUX, 93).

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Les échantillons de marne et de calcaire argileux d'Ecrouves se présentent comme des roches massives où l'on voit un fin litage. Ils sont de couleur gris bleuté. Les bancs calcaires sont un peu plus pâles. La sédimentation semble avoir été très régulière.

Au microscope, les deux roches paraissent analogues. L'aspect général est homogène et la calcite domine largement l'ensemble. Les textures normale et parallèle à la sédimentation sont identiques et homogènes. La phase argileuse est presque entièrement masquée; le peu qui en apparaît est amorphe, avec apparition de paillettes cryptocristallines aux limites floues.

La calcite est formée de cristaux d'une dizaine de μ ayant parfois la forme rhomboédrique et qui sont libres les uns vis-à-vis des autres au milieu du fond argileux. L'ensemble ne donne pas l'impression d'une mosaïque calcaire, mais d'un assemblage de particules isolées qui correspondent bien à l'aspect très tendre et presque pulvérulent des roches quand elles sont sèches.

Le quartz est formé d'éclats de 20 à 60 μ . La taille la plus fréquente est 40 μ . Le quartz est plus abondant dans le calcaire. De même, le seul minéral accessoire qu'on remarque est la glauconie, plus abondante dans le calcaire. Dans la marne, par contre, des concrétions opaques et noires sont visibles, indéterminables. On doit les retrouver au lavage.

Le lavage, qui n'a pu être fait que sur la marne, montre parmi des débris de roches, de la pyrite très abondante, avec agrégats de calcite et quelques grains de quartz dont certains sont polis. Les organismes sont surtout des débris d'Echinodermes, de coquilles, avec quelques valves d'Ostracodes et quelques exemplaires de *Robulus*.

3° ANALYSE DES ROCHES.

La marne d'Ecouves contient 34 % de Carbonate de chaux et pas de Dolomite (0,6 % de MgO); 1,8 % d'insolubles et pas de sels solubles; 0,98 % de Fer calculé en Pyrite. Le pH est de 7,9.

Le calcaire marneux d'Ecouves contient 45 % de Carbonate de chaux et pas de Dolomite (0,48 % de MgO); 2,4 % d'insolubles; et pas de sels solubles dans l'eau; 1,02 % de Fer exprimé en Pyrite. Le pH est de 8,3.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase très calcaire mais où le milieu a été assez anaérobie pour permettre la genèse des sulfures. Les diagrammes de Rayons X donnent les résultats suivants :

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Il concerne la marne d'Ecouves. Les lignes mesurées sont les suivantes : 14.f et floue — 11.f et floue — 9,85.AF — ombre entre 14 et 9,85 — 7,10.F — 5.m — 4,70.tf — 4,27.m et circulaire — 3,58.F — 3,33.TF. Ces lignes permettent de qualifier dans le mélange des minéraux argileux appartenant aux groupes de la Chlorite, de l'Hydrobiotite, de l'Illite, sans doute hydratée pour une part, et de la Kaolinite. La proportion de cette dernière par rapport aux minéraux micacés est de 40 %.

Le deuxième spectre a été fait de la même manière mais concerne le calcaire d'Ecouves. Les lignes mesurées sont : 14.f — ombre entre 14 et 9,9 — 9,9.F — 7,1.F — 5.m — 4,70.tf — 4,28.m et circulaire — 3,59.AF — 3,35.F granuleuse et circulaire — 3,33.F. Le mélange est analogue. Sans doute la proportion d'Hydrobiotite-Chlorite, bien que faible, est un peu plus importante car la raie à 14 Å est plus nette. La proportion de Kaolinite est un peu plus faible, ainsi que l'intensité relative des raies permet de le supposer.

L'analyse chimique dont les résultats sont indiqués au tableau

SiO ₂
Sesq

n° 7 indique un rapport — qui est respectivement pour la marne

et pour le calcaire, de 3,73 et 4,26. De même la quantité de potasse est de 4,44 et de 4,81 alors que celle de magnésie est de 2,66 et de 2,88. On voit que si l'interprétation des analyses chimiques est correcte, elle confirme l'indication des Rayons X, selon laquelle la proportion de minéraux micacés serait plus forte dans les bancs calcaires que dans les autres.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin et les conditions de sédimentation sont celles d'une vase de plate-forme continentale très calcaire mais sulfureuse. Le pH est 7,9 et 8,3. La formule représentative de ces deux roches est :

Marne : C 34 (Cal) + I 1,8 + Fe 1 (Pyrite) + A 63 (I + HC > K).
Calcaire marneux : C 45 (Cal) + I 2,4 + Fe 1 (Pyrite) + A 51 (I + HC >> K).

— 18 —

KIMMERIDGIEN
POISSONS (Haute-Marne)
Calcaire argileux

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé dans le fond d'un large puits creusé à 1 km à l'Est de Poissons (6 km Est de Joinville), pour l'alimentation en eau de cette commune. C'est un calcaire argileux gris-bleu qui alterne avec des bancs de marnes. L'échantillon a été pris dans un banc calcaire. La faune recueillie montre de grandes quantités de petites *Exogyra virgula* Defr., *Disaster granulosus* Ag., *Natica Arca*, *Pholadomya*. On se trouve ici dans la partie supérieure du Kimmeridgien ou Virgulien. Il s'agit de la zone inférieure à *Aspidoceras orthocera* d'Orb. Le milieu est marin. Les caractéristiques de cette mer peuvent être précisées. DURAND (100) a cherché à les reconstituer par l'étude des faunes et des déformations des coquilles sous l'influence du milieu. Il conclut pour la zone à *Aspidoceras orthocera* à une profondeur de 60 mètres pour la région de la Meuse (NICKLES, 309; CORROY, 73; DURAND, 100). Le calcaire bleu de Poissons est donc encore un dépôt de plate-forme continental du même genre que les dépôts examinés jusqu'ici. Il s'agit encore d'un dépôt boueux, étant donné le grain fin de la roche, mais il se rapproche de l'allure d'un calcaire et mérite la dénomination de calcaire argileux.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est un calcaire argileux gris faiblement bléuté dans lequel on devine un délit parallèle à la sédimentation mais ce litage n'est pas suffisant pour empêcher que la cassure ne soit souvent conchoïdale. Ici ou là, la roche montre des morceaux de coquilles

pris dans sa masse mais peu nombreux. A part ces accidents, l'aspect est massif et régulier.

Au microscope, l'aspect général est celui d'un calcaire homogène. La texture, semblable dans toutes les directions, révèle à peine la phase argileuse dans les biseaux et ne montre aucune orientation. L'argile apparaît isotrope et floconneuse mais elle est constellée, même aux endroits les plus minces de la préparation, de petits cristaux de calcite. Ceux-ci, variant entre 5 et 50 μ , sont accumulés les uns à côté des autres sans paraître engrenés. Les grains de quartz, en forme d'éclats, sont assez abondants. Ils varient de 10 à 60 μ . La taille la plus fréquente semble 20 μ .

On ne voit pas de traces d'organismes. Les minéraux accessoires sont très rares, si ce n'est dans un fond un peu ocre quelques sphérules de pyrite et quelques grains de magnétite.

La roche ne se délite pas dans l'eau et n'a pu être lavée.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 82 de CO_3Ca et pas de Dolomite. La proportion de MgO dans la liqueur qui suit l'attaque chlorhydrique est de 2,88 %, ce qui est assez considérable mais le spectre de Rayons X ne montre pas les raies de la Dolomite. Aussi faut-il considérer cette magnésie comme adsorbée sur la phase argileuse et mêlée à la chaux de la calcite. On doit noter également 1,9 % d'insolubles mais pas de sels solubles dans l'eau et 0,64 % de fer exprimé en sesquioxyde étant donnée la faible importance de la magnétite et de la pyrite. Le pH est de 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

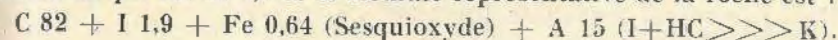
Les conditions de sédimentation du calcaire argileux de Poissons sont celles d'une boue extrêmement calcaire mais où certaines caractéristiques des vases anaérobies se révèlent déjà, en particulier par la couleur bleue et la présence de pyrite visible au microscope dans la roche. Les diagrammes de Rayons X donnent les résultats suivants :

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14.f et nette — ombres entre 14 et 9,9 — 9,9.TF — 7,1.F — 5.F — 4,70.tf — 4,29.m et circulaire — 3,58.F — 3,35.TF et circulaire — 3,33.F. Ces lignes permettent de décrire dans le mélange les minéraux argileux du groupe de la Chlorite, de l'Hydrobiotite, de l'Illite probablement hydratée pour une part, de la Kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est évaluée à 20 % au maximum.

Le deuxième spectre a été fait sur une plaquette glycérolée qui montre les raies suivantes : 10.AF — 7.m — 5.f — 3,58.f — 3,33.F. Il existe de plus une ombre à l'intérieur du cercle à 10 A°. Cet essai montre que la raie à 14 A° ne doit pas être attribuée à la Montmorillonite puisqu'aucune ligne de la Montmorillonite glycérolée n'apparaît, au contraire de certaines roches étudiées plus loin.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin et les conditions de sédimentation correspondent au dépôt d'une vase extrêmement calcaire sur le fond de la plate-forme continentale avec tendance aux fermentations anaérobies. Le pH est de 7,8 et la formule représentative de la roche est :



— 19 —

APTIEN
LOUEMONT (Haute-Marne)
Argilite

Illustration : Analyse chimique tableau 7.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été recueilli dans une carrière de la Tuilerie de Louvemont (Haute-Marne), à 15 km au Sud de Saint-Dizier. Une faune est possible à récolter : *Douvilleiceras cornuelianus* (d'Orb.), *Parahoplites deshayesi* (Leymerie), *Ancyloceras matheroni*, *Nautilus plicatus* (Filton), *Plicatula placunea* (Lam). Elle date cette formation du Bédoulien supérieur. Le milieu de sédimentation est marin mais difficile à préciser (71). La faune récoltée est principalement formée de Céphalopodes qui n'indiquent rien sur le milieu. On ramasse dans la carrière de nombreux nodules riches en Limonite, qui font supposer des phénomènes d'altération ou de diagénèse assez importants (BUVIGNIER, 47; CORNUEL, 66 bis; Bibliographie importante dans CORROY, 71).

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une Argilite. On n'y voit pratiquement pas le délit des shales. Ocrée dans sa masse, cette Argilite fait volontiers une pâte plastique avec l'eau.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une Argilite avec grains de quartz épars plus abondants que dans la majorité des roches marines étudiées. Les textures normale et parallèle sont identiques et homogènes. La phase argileuse est parfaitement visible. Elle est en grande partie cristallisée, apparaissant sous forme de paillettes biréfringentes assez bien développées. Une partie de la phase argileuse est isotrope mais dans l'ensemble elle est beaucoup plus cristalline que dans les roches précédentes.

Il ne semble pas y avoir de calcite. Les grains de quartz sont abondants. Ils varient de 20 à 150 μ ; la taille la plus fréquente semble être 100 μ . Quelques grains de glauconie sont visibles (20 μ environ) ainsi que quelques grains d'un oxyde de fer opaque. Mais le minéral accessoire principal est la Limonite qui imprègne toute la roche.

Le lavage de l'Argilite n'a pas révélé d'organismes mais une grande quantité de petits cristaux de gypse. De même, on voit des petits agrégats de sable collés par de l'oligiste. On a supposé que ces cristaux de gypse sont un produit d'altération de la pyrite, ainsi qu'il est fréquent dans de telles roches. Par ailleurs on observe des concrétions ferrugineuses en forme de rognons ou de bâtons (tube d'Annélide arénacé ?).

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche ne contient pas de Calcite ni de Dolomite. Il faut noter 6,2 % d'insolubles et 3,4 % de gypse. Le fer est représenté par 0,62 % de la roche quand on l'exprime en sesquioxydes. Le pH est 7,9.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Cette Argilite est en somme d'une allure assez originale. Il serait nécessaire d'étudier plusieurs affleurements du Bédoulien de Haute-Marne, affleurements qui sont d'ailleurs rares, pour mieux comprendre les conditions de genèse de cette formation. Le sédiment est certainement marin mais le gîte situé dans la zone d'oxydation au flanc d'une butte a peut-être été fortement altéré. J'ai admis qu'il s'agissait du produit d'évolution d'une *vase non calcaire et sulfureuse* dans laquelle les sulfures auraient été complètement transformés en gypse d'une part et en limonite d'autre part. Cette hypothèse, sans être certaine, est *plausible* (1). Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants : les deux spectres ont été faits avec deux montages différents, sur des plaquettes sédimentées

(1) Un forage récent fait à Valcourt (Haute-Marne) vient de me livrer un Bédoulien gris bleu, peu calcaire et pyriteux.

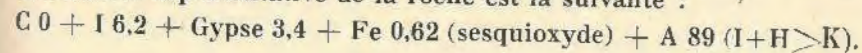
à partir d'une suspension dispersés à l'ammoniaque. Les lignes données par le premier sont les suivantes : 14.AF — 10.TF — 7.F — 5.m — 3,58.m — 3,34.F.

Les lignes plus nombreuses et mieux définies données par le second sont : 14.m floue — ombre entre 14 et 9,9 — 9,9.F — 7,2.F — 5.AF — 4,27.AF et circulaire — 3,58.AF — 3,35.TF et circulaire. On voit dans cette roche le mélange habituel des minéraux du groupe de l'Hydrobiotite-Vermiculite, de l'Illite sans doute hydratée pour une part et de la Kaolinite. La présence de la Chlorite malgré la raie nette à 14 Å n'est pas probable à cause de l'absence de la raie à 4,70 Å. La proportion de la Kaolinite est évaluée à 40 %.

L'analyse chimique dont les résultats sont donnés au tableau SiO₂ n° 7 indique un rapport ——— égal à 3,33 et une proportion de Sesq potasse et de magnésie, de 4,42 et 2,24 pour 100 grammes de silicate déshydraté.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions sont encore mal définies, mais sont définissables; provisoirement, on peut les considérer comme celles d'une vase sulfureuse non calcaire. Le pH est 7,9 et la formule représentative de la roche est la suivante :



— 20 —

ALBIEN
MOESLAINS (Haute-Marne)
Grès vert

Illustration : Analyse chimique tableau 20.
Spectre planche VII, figure 3.
Graphique figure 2.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon de grès vert a été prélevé à l'extrême base de la carrière de Moeslains (Haute-Marne), village situé à 7 km à l'Ouest de Saint-Dizier. Les grès verts appartiennent à l'Albien. Seule est

douteuse la position des grès blancs et jaunes de Valcourt qui leur sont inférieurs (71, 180). On ne sait si ces sables et grès de Valcourt, qui m'ont livré un *Ancyloceras*, représentent le Gargasien ou un faciès accidentel de la base des grès verts. De toute façon, ils représentent le début de la transgression du crétacé moyen. Les grès verts de l'Albien sont un faciès transgressif et fortement détritique. La roche livre peu de fossiles mais sa composition, où généralement le quartz domine sur la glauconie, en fait un faciès littoral. On y trouve de nombreux morceaux de bois fossilisés et chargés de pyrite ainsi que des nodules de Phosphates de chaux nommés coquins. L'ensemble est une formation détritique superficielle formée en milieu très agité.

Il paraît nécessaire d'étudier cette roche typiquement glauconieuse, avec les autres roches argileuses. La meilleure raison est que la glauconie s'est révélée aux minéralogistes être l'isotype ferrique de l'illite dans la série dioctaédrique des argiles de type mica; mais une autre raison réside dans ses propriétés. Le grès vert désagrégé et lavé peut donner une boue verte avec sa phase glauconieuse comme en témoigne le fond des flaques des carrières. Enfin, le grès vert de Moeslains est exploité pour la fonderie comme sable à noyaux naturel. Rien que cette qualification des usagers révèle des propriétés argileuses certaines. Telles sont les principales raisons qui me font considérer les roches glauconieuses comme des roches argileuses d'un type particulier mais qui doivent être étudiées avec elles (Bibliographie CORNUEL, 66 bis; CORROY, 71; HOU-DARD, 180; CAYEUX, 60).

2 EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est consistante mais se désagrège sous le doigt. L'examen à la loupe en montre les éléments : grains de quartz roulés cimentés par la glauconie vert vif qui devient vert pâle et même ocre à l'affleurement.

Au microscope, l'aspect général est celui d'un grès. Les grains de quartz sont roulés. Ils ne sont pas les seuls éléments arrondis; une proportion à peu près égale de grains de glauconie de la même taille que les quartz est parfaitement visible. Le tout est emballé dans un ciment qui est une deuxième manière d'être de la glauconie qui remplit les interstices entre les sphères siliceuses et glauconieuses. En certains endroits, ce ciment est remplacé par de l'opale complètement isotrope, mais qui est volontiers teintée en ocre. Les grains de glauconie eux-mêmes ont leur allure habituelle cryptocristalline et polarisent dans une teinte moyenne du premier ordre qui les fait paraître verts entre nicols croisés. Un minéral opaque en grains se trouve dans chaque champ.

Le lavage de la roche a montré à côté de grains de sables roulés, des grains noirs et lisses impossibles à déterminer à la loupe bino-culaire par les caractéristiques minéralogiques habituelles. Les essais microchimiques ont montré que ces grains contiennent un carbonate et un phosphate avec de la chaux et du fer. Une étude plus précise est nécessaire mais on peut y voir des sortes de coquins microscopiques. L'un d'eux avait les formes extérieures d'une petite tige de gymnospermes transformée entièrement par épigénie.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

Il n'existe dans cette roche que des traces de carbonate de chaux, qui doivent correspondre aux nodules phosphocarbonatés décrits plus haut. L'abondance du sable donne une proportion de 52,2 % d'insolubles. L'opale a été dosée par lessivage à la soude; on obtient ainsi le chiffre de 2,7 %. Il est fort possible que ce chiffre soit exagéré par suite de l'altération du silicate par la lessive utilisée, c'est pourquoi j'indique ce chiffre comme maximum. Le fer dosé correspond à 0,42 %, exprimé en sesquioxyde. Le pH est 8,2.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les raies sont peu nombreuses; ce phénomène est dû à la richesse de la glauconie en fer ferrique qui absorbe les radiations $K\alpha$ du cuivre. Néanmoins, l'équidistance de base est parfaitement nette et les lignes mesurées sont les suivantes : 9,9.TF — 5. très floue — 4,26.m et circulaire — 3,35.TF et circulaire — 3,33.m et floue. En dehors des lignes qui correspondent à une fine fraction de quartz, le spectre révèle la présence d'un minéral lamellaire dont l'équidistance basale est de 10 Å. Ceci correspond à ce qu'on connaît du spectre de Rayons X de la glauconie (pl. V, 3).

L'analyse chimique, dont les résultats sont donnés au tableau

	SiO ₂
n° 7, montre un rapport	— de 3,84. La proportion de potasse
	Sesq

et de magnésie est de 7,06 et de 2,75 pour 100 grammes de silicate déshydraté.

Cette analyse s'inscrit bien parmi celles qui ont été données par HENDRICKS et ROSS (175) et qui montrent les variations de composition de la glauconie.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions de sédimentation sont celles

d'une mer superficielle et non forcément littorale qui fut fortement agitée. Cette mer constitue un milieu oxydant propice à la peroxydation du fer. Ce n'est qu'après le dépôt que s'installe un milieu réducteur qui permet les fermentations anaérobies qui sont à l'origine des sulfures. Le pH est de 8,2 et la formule représentative de la roche est :

$C\ 0 + I\ 52.2 + Opale\ 2.7\ (max) + Fe\ 0.42\ (sesquioxyde) + A\ 44$
(Glaucanie).

— 21 —

ALBIEN
MOESLAINS (Haute-Marne)
Marne

*Illustration : Photo plaque mince planche II, figure 1.
Analyse chimique tableau 8.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

La marne albienne a été prélevée dans la même carrière de Moeslains que l'échantillon précédent. Elle appartient à l'Albien supérieur où l'on peut trouver une faune assez variée mais très fragile, en particulier : *Douvilleiceras mamillatum* (Schloth). Il est important de noter que le passage entre le grès vert et la marne de Moeslains n'est pas soudain. Si le sommet de la carrière est une marne franche, si la base est un grès glauconieux franc, il est très difficile de préciser où la limite se trouve. On peut effectivement suivre à la binoculaire la présence de sphérules de glauconie dans la couche intermédiaire. La proportion diminue rapidement, sauf quelques lentilles sableuses et vertes qui montrent une récurrence. La couleur noire de la marne est si caractéristique que la falaise qui domine la rive gauche de la Marne porte le nom de « Côtés Noires ». Le milieu de sédimentation marin peut être précisé; la mer est encore agitée. La proportion de sable est grande, accompagnée de lamelles de muscovite. La glauconie reste présente jusqu'au sommet. Les concrétions de pyrite sont nombreuses. On a donc affaire à un sédiment plus vaseux que le grès vert, mais la faune reste littorale par beaucoup de ses caractères. Ceci n'est valable que pour la base de l'étage car la mer s'approfondit plus tard.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La marne paraît noire bleutée. On voit briller les quartz et la muscovite et l'on remarque les points noirs de la glauconie. Le tout est emballé dans la pâte marneuse.

Au microscope (pl. 1), l'aspect est celui d'une marne gréseuse et glauconieuse. La calcite ne paraît pas abondante. La texture est homogène et même dans la carrière on ne peut distinguer le fil de la sédimentation. La phase argileuse est cryptocristalline, c'est-à-dire que dans un fond isotrope, des lamelles faiblement biréfringentes et mal limitées apparaissent.

La calcite est très peu abondante et apparaît en très petits cristaux isolés et sans formes propres. Leur taille est très faible et de quelques μ . Les grains de quartz sont très abondants et très gros. Les plus gros atteignent 200 μ et sont arrondis. Les plus petits ont 10 à 20 μ . La taille moyenne est de 100 μ et se présente sous forme d'éclats irréguliers. Le minéral accessoire le plus important est la glauconie en grains arrondis. On voit quelques lames de muscovite et quelques minéraux opaques.

Le lavage montre une grande abondance de grains de sable au milieu desquels on trouve quelques concrétions pyriteuses et phosphatées. Aucune trace d'organisme n'est visible.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 3,2 % de Carbonate de chaux et pas de Dolomite; 15,6 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; enfin, 0,46 % de fer exprimé sous forme de pyrite. Le pH est 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation de cette marne de Moeslains sont celles d'une vase où les sulfures témoignent d'un milieu réducteur mais où des éléments détritiques et superficiels se sont trouvés engagés (grains de quartz et de glauconie). Le diagramme de Rayons X donne les renseignements suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : ombre entre 14 et 9,8, épaissie aux environs de 11 — 10.F — 7,1.F — 5.m et floue — 3,57.AF — 3,33.AF. Ces lignes montrent la présence des minéraux du groupe de l'Illite sans doute hydratée pour une part, de la Kaolinite et peut-être d'Hydrobiotite ainsi que l'indique la comparaison avec les autres roches. La proportion de Kaolinite est évaluée à 40 % environ.

L'analyse chimique dont les résultats sont indiqués au tableau n° 8 montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 4,37$ et une proportion de potasse et de magnésie de 3,93 et 1,62.

5° CONCLUSION.

Le milieu est marin. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase peu calcaire et faiblement sulfureuse. Le pH est 7,8 et la formule représentative de la roche :
 $\text{C } 3,2 + \text{I } 15,6 + \text{Fe } 0,46 \text{ (Pyrite)} + \text{Glaucanie } 5 + \text{Muscovite } 3,5 + \text{A } 72$
 (I + H > K).

— 22 —

TURONIEN
 SENONCHES (Eure-et-Loir)
 Craie marneuse

Illustration : Rayons X, planche V, figures 1 et 2.

1° GITE ET STRATIGRAPHIE.

Cet échantillon de craie a été prélevé près de Senonches, dans l'Eure-et-Loir par M. LECOMTE. La craie est exploitée là par carrière et par puits. Elle forme à proximité des exploitations une boue collante d'où elle tire son nom de craie marneuse. Elle appartient au Turonien représenté par une teinte grise sur la carte géologique (Chartres S.-O. : 1/80.000). Le milieu est évidemment marin et les conditions de sédimentation de ce sédiment sont parmi celles qui sont le mieux connues après les travaux de CAYEUX (60-63). A plusieurs reprises CAYEUX parle de la matière argileuse contenue dans la craie et il est évident qu'en l'état des techniques dont il disposait, il ne pouvait pénétrer sa nature. C'est la raison pour laquelle cet échantillon assez exotique par rapport à ceux de ce travail, a été analysé. Il doit donner une première indication qu'il sera nécessaire de multiplier. Quoi qu'il en soit on dispose ici d'un sédiment de plate-forme continentale extrêmement calcaire, où la fraction argileuse est vraiment accessoire.

2° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 92,82 % de CO_3Ca et pas de Dolomite (1,67 % de MgO). On peut doser par ailleurs 2,4 % de quartz et 0,143 % de fer exprimé en Limonite. Le pH de la roche est 8,5.

3° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

La phase argileuse a été extraite par une longue attaque à l'acide chlorhydrique décimormal. Deux diagrammes de Rayons X ont été obtenus. Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Le calcul des espacements réticulaires a donné les résultats suivants : 15,07.TTF — 10.F — 9,07. fine et faible ? — 5,1.f — 4,44.f — 3,34.AF. (pl. V. 1).

Je n'ai pas su interpréter la raie à 9,07. Par contre la paire d'accolade très épaisse à 15 A° est très semblable à celle qu'on rencontre chez les Montmorillonites et les harmoniques 5,1 — 4,44 et 3,34 s'accordent avec cette hypothèse. Pour confirmer cette dernière un traitement au glycérol a été fait. Il a donné les résultats suivants : 17.TF — 8,85.AF — 5,85.m — 4,48.m — 3,58.m — 2,97.f. Ces raies sont typiques et ce sont celles qui caractérisent la Montmorillonite glycérolée (pl. V, 2).

1° CONCLUSION.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue très calcaire et marine. Le pH de la roche est 8,3. La formule représentative est :

$\text{C } 93 + \text{I } 2,4 + \text{Fer } 0,143 \text{ (sesquiox.)} + \text{A } 4 \text{ (M)}.$

CHAPITRE CINQUIÈME

ETUDE SYSTÉMATIQUE DE ROCHES D'ORIGINE LAGUNAIRE

Ce chapitre cinquième sera consacré à l'étude de roches sédimentaires argileuses qui méritent le nom de roches d'origine lagunaire. Ce caractère est plus ou moins net. Tantôt la lagune liée à la mer en subira quelque influence. Tantôt la lagune est proprement continentale et se rapproche d'un lac. Il y a là toute une série de nuances dont beaucoup sont inaccessibles à nos yeux actuels quand ils se sont passés dans les temps géologiques. On essaiera, pour chaque roche, d'en discuter une reconstitution au moins fragmentaire. Un grand nombre des roches étudiées provient de Lorraine. La carte représentée à la figure II en représente les affleurements. Le plan suivi pour chaque étude de roche est le même que précédemment (voir page 126).

— 23 et 24 —

MUSCHELKALK Groupe de l'Anhydrite PEXONNE (Meurthe-et-Moselle) Marne verte et Argilite rouge

Illustration : Analyse chimique tableau 8.

1° LE GROUPE DE L'ANHYDRITE EN LORRAINE.

La série du Muschelkalk est plus réduite vers sa base en Lorraine qu'en Allemagne. Cependant on peut y retrouver l'équivalent des divisions allemandes. Celles-ci sont, de bas en haut : Wellenkalk,

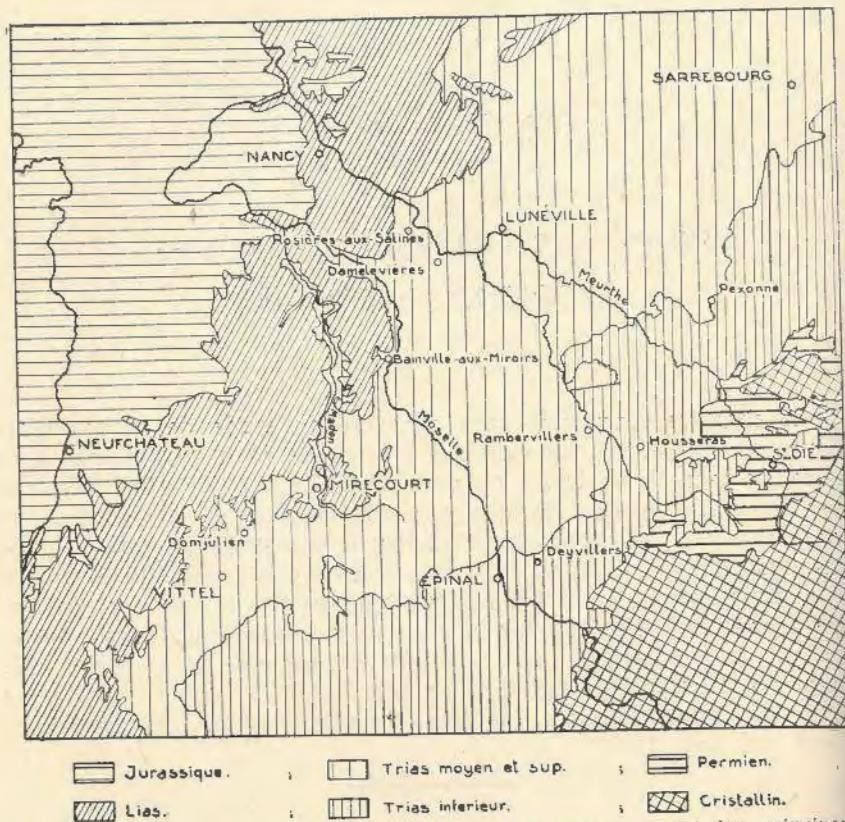


FIGURE 11. — Esquisse géologique de la Lorraine situant les principaux affleurements de roches lagunaires étudiées.

Anhydritgruppe, Hauptmuschelkalk et Lettenkohle. On examinera le cas de l'Anhydritgruppe. Il est représenté en Lorraine par deux niveaux successifs : un niveau inférieur, dit des argiles de Pexonne, qui est formé d'argilites ou de marnes violettes et vertes; un niveau supérieur formé de marnes dolomitiques appelées couches grises par GUILLAUME (160).

A) Le niveau inférieur est dit des argiles de Pexonne. Cette location est un peu impropre car la majorité des roches qui affleurent à Pexonne sont des marnes. Ce faciès est très reconnaissable et il convient fort bien pour la tuilerie et la poterie. Aussi fut-il exploité très fréquemment autrefois. Aujourd'hui encore, il existe des exploitations tout le long de cette auréole, comme celles de Niderviller (Moselle), Pexonne (M.-et-M.), Housseras, Grandvillers, Dayvillers (Vosges). D'anciennes exploitations montrent encore des affleure-

ments ou permettent de prélever facilement des échantillons; telles sont : Niderhoff, Badonviller, Rambervillers (route de Baccarat), Autrey, Naydoilles, Les Forges. Le faciès est toujours le même : argilites vertes et violettes pouvant parfois devenir marneuses (marnes dolomitiques). Parfois une certaine schistosité se développe, soit en donnant à l'argilite l'allure d'un shale (Dayvillers), soit celle d'un schiste (sans métamorphisme) par la présence d'une assez grande quantité de quartz (Les Forges, près d'Epinal). Les variations de cette formation sont intéressantes et sont à l'étude en ce moment : il semble qu'au nord de la Meurthe, les carbonates sont plus abondants qu'au sud où il n'est pas rare qu'ils manquent complètement. Mais ceci ne pourra être assuré que quand un assez grand nombre d'affleurements sera étudié et il faut remarquer que Niderviller, en Moselle, est peu calcaire. Le niveau des argiles de Pexonne est salifère et gypsifère. En particulier le gypse fut exploité à Glonville pour des besoins locaux. D'autre part, au forage de Méné-Flin, de 1890, 1 m. 40 de sel gemme fut traversé. GUILLAUME (161) décrit une pseudomorphose de sel gemme dans une plaquette de dolomie de ce niveau. Le forage de Rambervillers (JOLY, 191) coupa 1 m. 25 de gypse, juste au sommet des argiles de Pexonne, à la base des couches grises. Le forage de Moncel-lès-Lunéville cite des marnes rouges avec grains de gypse. Enfin, le forage de Méné-Flin de 1948 que j'ai analysé récemment a donné vers sa base des marnes bariolées à gypse. L'épaisseur qu'on peut attribuer au niveau bariolé de Pexonne, par toutes les données recueillies, est de 25 m. environ en Lorraine méridionale. Tous ces faits permettent de définir convenablement ce niveau et de préciser ses conditions de sédimentation. Le milieu est lagunaire et selon les variations du faciès horizontalement et verticalement, cette lagune fut sursalée ou seulement salée. Les variations dans la teneur en calcite, en dolomite, en sel gemme et en gypse sont nombreuses et chaque point mérite d'être étudié en particulier.

B) Le niveau supérieur à celui de Pexonne est connu grâce à LEVALLOIS (234), VAN VERWECKE (377) et GUILLAUME (160, 161). Ce dernier lui donne le nom de « couches grises ». Elles sont constituées de calcaires, dolomies et marnes avec silex. La partie inférieure est plus volontiers marneuse — marne gris foncé, se délitant en petites plaques, contenant des dolomies cloisonnées et des silex. Ce niveau est salifère. Le forage de Saint-Clément a donné du sel dans la partie inférieure (GUILLAUME, 160); celui de Dompaire (GUILLAUME, 161), du gypse; celui de Rambervillers (JOLY, 191), du gypse; celui de Moncel-lès-Lunéville, du gypse, du sel et de l'anhydrite; enfin, celui de Méné-Flin 1948 m'a révélé du gypse en passées sur toute l'épaisseur. Le milieu de genèse est encore

lagunaire. Sans doute la sédimentation est plus carbonatée mais les passées salines sont fréquentes, quand elles ne sont pas très épaisses. Plusieurs échantillons ont été prélevés dans ce groupe de l'anhydrite. Leur mise en place dans la paléogéographie triasique étant ainsi approchée, il convient de les étudier successivement.

2° PEXONNE - GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Les deux échantillons de Pexonne ont été prélevés dans la marne actuellement en exploitation pour la tuilerie de Pexonne, située à 3 km. au Sud de Badonviller (M.-et-M.). Les niveaux rouges et verts alternent. On ne connaît pas de sels figurés à Pexonne mais ils ont peut-être été entraînés par dissolution. Les bandes rouges et vertes alternent avec des limites floues et sinueuses. On pourrait croire que le gîte a été ondulé. Ceci vient sans doute des mouvements occasionnés dans les séries gypsifères par la dissolution de celui-ci. Les conditions de genèse ont été décrites au paragraphe précédent. Le milieu est lagunaire. Les conditions furent-elles celles d'une lagune sursalée ? On n'a pas d'argument certain. Seules les suppositions faites plus haut sur la disparition du gypse peuvent permettre de le penser. Par ailleurs, les marnes bariolées de rouge, de vert, de violet, parfois de jaune ou de noir sont bien connues des stratigraphes qui ont eu très souvent la possibilité de prouver leur origine lagunaire. Le contraste entre cette première marne lagunaire et la dernière marne marine étudiée, celle de Moeslains, est tout à fait typique par l'opposition de leur aspect et de leur couleur.

3° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Marne verte*. — La roche est d'un vert très pâle plutôt gris. Elle est friable, grumeleuse et sans structure apparente. On ne distingue rien en dehors de la pâte.

Au microscope, l'aspect est celui d'une marne assez calcaire. Alors que la roche n'était pas possible à orienter, la texture montre des alignements qui ne semblent pas dus à l'abrasif. On voit des concrétions de calcite cristallisée qui sont alignées. Parallèlement à cet alignement, des zones plus fines alternent avec des zones moins fines, les particules restant extrêmement ténues, de l'ordre de quelques μ . Les cristaux de carbonates sont très petits et montrent leur forme rhomboédrique; ils sont libres les uns par rapport aux autres mais sont trop nombreux pour que la matière argileuse soit visible. Aucune trace organique n'est observable. En dehors des cristallisations de calcite alignées, on aperçoit quelques rares quartz en forme d'éclat de 15 à 70 μ . La taille la plus fréquente est 30 μ .

Le lavage de la marne a montré un grand nombre de cristaux de

carbonates transparents, ayant leurs formes cristallographiques et quelques grains de sable.

B) *Argilite rouge*. — Cette roche fait une effervescence extrêmement discrète aux acides. Elle est grumeleuse et ne présente rien d'autre à l'œil nu ou à la loupe binoculaire qu'une masse argileuse rouge violacé.

Au microscope, l'aspect général est également homogène, argileux et rouge. On n'aperçoit pas de calcite et seulement quelques rares grains de quartz. La masse argileuse est parfaitement visible. Elle apparaît en zones différentes plus ou moins fines qui doivent correspondre aux grumeaux visibles à l'œil nu. On peut supposer que l'absence de structure et l'aspect grumeleux des deux roches de Pexonne viennent des modifications dans le gîte, par altération. La dissolution du gypse provoque des mouvements dans le gîte qui sont tels que la structure des roches est complètement effacée. Les minéraux accessoires sont très rares : quelques grains de quartz de 30 μ très dispersés et très rares. La roche est teintée en rouge vif dans toute sa masse.

Le lavage n'a donné que quelques cristaux de calcite rhomboédrique et quelques grains de quartz.

1° ANALYSE DES ROCHES.

La marne verte contient 24,60 % de calcite et 19,27 % de dolomite; 1,1 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; 0,50 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est de 7,9.

La marne rouge contient 1 % de calcite et pas de dolomite dosable; 1,6 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; 0,75 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,5.

5° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'un bassin lagunaire où il n'est pas certain que le milieu soit arrivé à sursaturation, de façon à précipiter les sels figurés. Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants :

Le premier spectre concerne la marne verte de Pexonne. Il a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. 14.f — ombre entre 14 et 10 — 10.F — 7,1.f — 5.f — 4,70.ttf — 4,27.f et circulaire. — 3,35.TF et circulaire.

Le deuxième, le troisième et le quatrième spectres concernent la marne rouge. Ils ont été faits sur des plaquettes préparées de la même manière mais avec des montages différents. Les lignes mesurées sont les suivantes :

Deuxième spectre : ombre entre 14 et 10 plus intense entre 14 et 12 — 10.F — 7,1.tf — 5.f — 4,27.tf — 3,58.tf — 3,34.F.

Troisième spectre : la raie à 14 A° est encore plus faible et à peine visible.

Quatrième spectre : 14.f — 10.TF — 7.tf et floue — 5.f floue — 4,70.ttf — 3,57.f et floue — 3,34.F.

L'ensemble de ces résultats montre la coexistence dans la roche des minéraux du groupe de l'Hydrobiotite, de la Chlorite, de l'Illite sans doute hydratée pour une part et de la Kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est inférieure à 10 %.

L'analyse chimique a été faite sur les deux échantillons, vert et rouge. Les résultats sont respectivement les suivants : $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,95$

et 3,33; la proportion de potasse est de 7,73 et 6,95; celle de la magnésie, de 4,90 et 4,44 pour 100 grammes de silicate déshydraté.

Si l'on devait interpréter brutalement les résultats de ces analyses, on serait tenté de croire que la proportion de Kaolinite est plus faible dans le Pexonne vert que dans le rouge, mais elle est tellement faible que ceci n'est pas appréciable aux Rayons X. Il faut noter que la proportion du Fe_2O_3 est de 6,55 pour la marne verte et de 8,90 pour la marne rouge. Il semble donc plus abondant dans le deuxième échantillon mais beaucoup moins qu'on ne pouvait s'y attendre.

6° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est lagunaire et non sursalé. Le pH des roches est de 7,9 et 7,5. Les formules représentatives des deux roches sont :

Marne verte : C 24,6 (cal) 19,27 (dol) + I 1,1 + Fe 0,5 (sesquioxyde) + A 54 (K + H >>>>>> K).

Marne rouge : C 1 (cal) + I 1,6 + Fe 0,75 (sesquioxyde) + A 97 (K + H >>>>>> K).

— 25 et 26 —

MUSCHELKALK MOYEN

Groupe de l'Anhydrite

DEYVILLERS (Vosges)

Argilite rouge et Argilite verte

Illustration : Analyse chimique tableau 8.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Ces deux échantillons ont été prélevés dans l'exploitation de la tuilerie de Deyvillers, située à 9 kilomètres au Nord d'Epinal (Vosges). La carrière montre une grande épaisseur du niveau bariolé de Pexonne. L'argilite rouge domine beaucoup sur la verte. Le milieu de genèse est lagunaire par raison de continuité avec la formation. Il n'y a aucune trace de formation salifère. La roche est un shale très typique dont la stratification n'est pas troublée, sauf au voisinage des affleurements, où a lieu l'altération. Le faciès bariolé des roches et toute la paléogéographie de ce niveau, ainsi que l'absence de fossiles, permettent de dire que le milieu de sédimentation est lagunaire mais non sursalé.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Argilite rouge* (n° 25). — La roche est un shale. L'argile se débite en plaques plates et lisses. Aussitôt mouillée, elle fait pâte avec l'eau. La teinte est rouge brun foncé.

Au microscope, l'allure générale est celle d'une argilite gréseuse. La texture normale à la stratification offre une allure cyclique caractéristique. Des lits formés d'une phase argileuse très fine alternent avec des lits composés essentiellement de menus quartz détritiques ou avec des lits où les phyllites sont nettement micacées. Ces diverses couches d'une telle microstratification sont à étudier de près.

a) *Couches gréseuses*. — Elles ont 1 millimètre d'épaisseur. Elles semblent composées aux trois quarts de quartz, le reste étant formé de phyllites micacées. Les quartz sont bien calibrés et n'oscillent qu'entre 20 et 60 μ . Les phyllites sont fortement biréfringentes et possèdent les caractéristiques de la muscovite. Elles ont généralement de 30 à 50 μ de long sur quelques μ de large. Les teintes de biréfringence sont celles de la muscovite. L'ensemble donne à peu près l'aspect d'un schiste mais ces différents éléments détritiques sont fondus dans une pâte argileuse rouge.

b) *Couches micacées*. — Les couches micacées sont du même genre que les précédentes. La proportion des micas et du quartz est simplement renversée. Ces couches sont rares et peu épaisses (200 μ).

c) *Couches argileuses*. — Elles forment le principal de la roche et ont 1, 2 ou 3 millimètres d'épaisseur. Elles restent constellées de paillettes micacées et de grains de quartz mais une phase argileuse teintée d'un rouge vif par de l'oxyde de fer forme l'essentiel. Mais on sort ici de ce qui est possible à examiner au microscope.

Le lavage n'a donné que quelques grains de quartz mêlés de paillettes de micas et quelques morceaux des couches siliceuses qui ne se sont pas désagrégées sous la force du jet d'eau.

B) *Argilite verte* (n° 26). — L'aspect est celui d'un shale onctueux au toucher, d'une couleur gris-bleu-vert. Aucun détail n'est visible à l'œil nu ni à la binoculaire. Un éclat mis sous la binoculaire en présence d'acide ne donne aucune effervescence.

Au microscope, l'allure générale est celle d'une argilite très fine et très pure. La texture normale à la stratification est orientée; la texture parallèle est homogène et cryptocristalline. Les lamelles biréfringentes sont très courtes et presque isodiamétriques. Pas de calcite ni de quartz ne sont visibles; on ne voit pas de traces organiques mais seulement quelques grains de magnétite.

Le lavage n'a donné que 2 ou 3 lames de muscovite et une dizaine de grains de magnétite au milieu de morceaux de roche non désagrégée.

3° ANALYSE DES ROCHES.

L'argilite rouge de Deyvillers ne contient ni calcite, ni dolomite, ni sels solubles dans l'eau. Par contre, on peut y doser 37 % d'insolubles et 1,2 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est de 7,9.

L'argilite verte ne contient pas non plus de calcite, de dolomite, ni de sels solubles dans l'eau. De plus, elle ne contient pas d'insolubles et seulement 0,28 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est de 7,7.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue lagunaire qui ne fut probablement jamais sursalée à cet endroit. Les diagrammes de Rayons X donnent les résultats suivants; 8 spectres ont été faits :

Les trois premiers concernent l'argilite verte. Ils ont été obtenus sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes :

Premier spectre : 14.m — 10.F — 7.AF — 5.m et floue — 3,58.m et floue — 3,34.AF et floue.

Deuxième spectre : 14.f — 11.f — 9,8.TF — ombre entre 14 et 10 — 7,1.m — 5.AF — 4,73.tf — 4,27.tf — 3,57.m — 3,34.TF.

Troisième spectre : la raie à 14 A° paraît plus forte. Le contraste entre les raies à 10 et à 7 est plus net.

Le quatrième spectre concerne l'argilite rouge et a été préparé de la même manière. Il donne les lignes de réfraction suivantes : 14.f — 9,9.TF — ombre entre 14 et 9,9 — 7,1.m — 5.m — 4,70.f — 4,27.f — 3,58.f — 3,38.AF et circulaire.

Le cinquième spectre a été fait sur une plaquette traitée au glycérol. Le résultat est : 10.TF avec une ombre intérieure au cercle — 7.ttf et très floue — 5.F — 3,33.TF. On ne voit apparaître aucune des raies de la montmorillonite glycérolée.

Le sixième spectre a été fait avec la même poudre, dans les mêmes conditions mais sans traitement au glycérol. Le spectre est identique au précédent.

Les spectres 7 et 8 ont été faits dans l'eau. Seule la raie à 10 A° est visible, avec une ombre à l'intérieur. Le témoin (spectre n° 10) montre une raie à 10 A° floue.

L'ensemble de ces recherches, faites par les méthodes destinées à se recouper qui ont été définies plus haut, indique dans ces roches un mélange de minéraux des groupes de la Chlorite, de l'Hydrobiotite, de l'illite peut-être hydratée pour une part et de la Kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est évaluée à 10 % environ. Le minéral dominant de beaucoup est l'illite.

L'analyse chimique a été faite sur les deux échantillons. Elle

donne, d'après le tableau n° 8, le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 2,58$ pour l'argi-

lite rouge et 5,36 pour la verte; la quantité de potasse est respectivement de 6,51 et de 7,02, tandis que celle de la magnésie est de 3,60 et de 3,07 pour 100 grammes de silicate déshydraté. On remarque ici encore que l'argilite verte est plus riche en silice et en potasse que la rouge. Les différences de teneur en minéraux micacés sont difficiles à apprécier étant donnée la faible importance de la kaolinite. On peut remarquer d'autre part que la fraction argileuse extraite de l'argilite rouge contient 4,2 % de Fe_2O_3 tandis que celle qui est extraite de l'argilite verte en contient 7,60. Ce résultat est exactement contradictoire avec celui qu'on a obtenu sur les marnes de Pexonne, si bien qu'il ne semble pas du tout assuré que dans les marnes bariolées, les niveaux rouges soient plus riches en fer dans leur phase argileuse que les niveaux verts.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est lagunaire et non sursalé. Le pH est de 7,9 et 7,7 et les formules représentatives des deux roches sont :

Argilite rouge : C 0 + I 37% + Mica 5 + Fe 1,2% (sesquioxyde) + A 56 (I+HC >>>>> K).

Argilite verte : C 0 + I 0 + Fe 0,28 % (sesquioxyde) + A 99 (I+HC >>>>> K).

— 27 et 28 —

MUSCHELKALK MOYEN
Groupe de l'Anhydrite
HOUSSEAS (Vosges)
Argilite verte et Argilite rouge

*Illustration : Analyse chimique tableau 8.
Analyse thermique figure 8, courbe V.
Spectre planche V, figure 4.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Les deux échantillons ont été prélevés dans l'exploitation de la poterie de Jeanménil. Cette exploitation se trouve sur le territoire de Housseras, à huit kilomètres Est de Rambervillers (Vosges). Le niveau est celui des argiles bariolées de Pexonne. Le milieu est lagunaire. On ne sait s'il y eut dépôt de roches salines. La stratification des roches est très tourmentée, dessinant de nombreux replis, et les couches même simulent, dans la partie Est de l'argilière, des sortes de chevauchements. Ceci pourrait faire songer à des mouvements dus à la dissolution de gypse ou de sel, mais aussi à l'influence de failles d'effondrement qui sont proches, si bien que la présomption en faveur d'un milieu lagunaire *sursalé* est faible. Le faciès rouge domine nettement sur le vert.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Argilite verte*. — Elle se trouve en minorité dans l'argilière. Elle apparaît comme un shale vert pâle. La roche se délite en plaquettes peu résistantes mais fait pâte rapidement avec l'eau.

Au microscope, une coupe normale à la stratification montre une texture cyclique. Il y a alternance de couches plus sableuses et de couches argileuses, ces dernières plus nombreuses et plus épaisses. Les couches sableuses sont composées pour moitié de grains de quartz et pour moitié d'une phase argileuse très fine. Les grains de quartz sont bien calibrés et ont de 10 à 40 μ .

Les couches argileuses sont extrêmement fines et cryptocristallines. Dans un fond isotrope brillent des phyllites fortement biréfringentes et qui sont entrecroisées. Aucun quartz n'est visible dans ces couches qui forment la dominante de la roche. Le lavage n'a donné que des grains de sable agglomérés et des grains d'oligiste.

B) *Argilite rouge*. — La roche est un shale très tendre qui perd son litage à la moindre pression. Le grain paraît extrêmement fin et rien n'est sensible à l'œil.

Au microscope, les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et homogènes. La phase argileuse est amorphe, formant entre nicols croisés un fond noir où l'on devine seulement la présence de fines lamelles cristallines. Mais les effets de biréfringence sont tellement faibles qu'on ne peut même pas les souligner avec le gypse teinte sensible. On ne voit pas de quartz. En lumière naturelle l'ensemble paraît coloré par de l'oxyde de fer irrégulièrement réparti en taches disséminées. Cette argilite est une des plus fines qu'on ait rencontré, et le principal intérêt de l'examen microscopique réside dans le fait qu'il montre une structure complètement cryptocristalline. Le lavage a donné seulement de nombreux grains d'oligiste.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'argilite verte de Housseras ne contient pas de calcite ni de dolomite (0 % de magnésie), 18 % d'insolubles, mais pas de sels solubles. 1,46 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est de 4,7.

L'argilite rouge ne contient ni calcite ni dolomite ni sels solubles dans l'eau, 1,4 % seulement d'insolubles et 1,76 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 5,4.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont lagunaires et sans doute non sursalées. Les diagrammes de Rayons X ont été faits sur des plaquettes sédimentées à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Le premier spectre concerne l'argilite verte et les lignes mesurées sont :

9,85.TF — avec une ombre à l'intérieur — 5.AF — 3,33.F. (pl. V, 4).

Le second spectre concerne l'argilite rouge et les lignes mesurées sont :

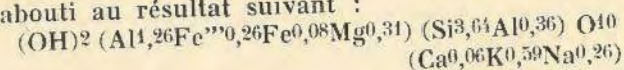
9,85.TF — ombre faible à l'intérieur de l'anneau — 5.AF — 3,35.F.

Le résultat de ces essais montre comme unique minéral dans la phase argileuse de ces deux roches, l'illite sans doute hydratée pour une part.

L'analyse thermique a été faite et les caractéristiques de la courbe sont données page 112. Celle-ci est représentée figure 8, courbe V. On remarque un infléchissement endothermique de la courbe à 480°, et un crochet exothermique à 870. Ceci confirme la présence d'illite pure dans la phase argileuse.

L'analyse chimique montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,89$. La proportion de potasse et de magnésie est de 6,63 et 3,27 g. pour 100 g. de silicate déshydraté.

La formule de ce minéral a été calculée (tableau 6, page 117) et on a abouti au résultat suivant :



Le spectre de Rayons X fait sur la fraction argileuse livrée à l'analyse chimique ne montre pas de quartz appréciable, et cependant la somme des ions en position octaédrique est de 1,91 et ce chiffre est sensiblement inférieur à 2. Par ailleurs on voit qu'un tiers du silicium sur quatre est remplacé en position tétraédrique par l'aluminium. Ce remplacement, qui est trois fois plus faible que dans les micas typiques, est tout à fait naturel pour l'illite. La somme des ions de la couche intermédiaire fait 0,81. Ce chiffre voisin de 0,80 est extrêmement fréquent dans les minéraux argileux micacés.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire non sursalé. Les conditions de sédimentation sont mal définies. Il est possible qu'une vigoureuse altération par les eaux d'infiltration dans un gîte très bouleversé explique le pH des échantillons. Ce phénomène expliquerait également l'absence complète d'ions Ca et Mg adsorbés sur la phase argileuse. Les chiffres de 4,7 et 5,4 sont, pour le pH, uniques parmi les roches marines et lagunaires étudiées. La formule de ces deux roches est :

Argile verte : C 0 + I 18 + Fe 1,46 (sesquioxyde) + A 80 (I).
Argile rouge : C 0 + I 1,4 + Fe 1,76 (sesquioxyde) + A 96 (I).

— 29 —

MUSCHELKALK MOYEN Groupe de l'Anhydrite RAMBERVILLERS Shales

Illustration : Spectre planche V, figure 5.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Des confusions peuvent s'établir quand on parle d'argile de Rambervillers. Il existait autrefois une tuilerie à Rambervillers, à proximité de la route de Baccarat; elle exploitait un peu au Nord de la ville des argiles bariolées du niveau de Pexonne. Il existe à Rambervillers une usine de grès flammés qui sont connus depuis fort longtemps. La terre qui sert à faire ces grès se trouve en lentilles dans les terrasses des environs; elle fut exploitée autrefois dans les bois de Ste-Hélène; elle l'est encore dans la terrasse qui constitue la colline de Jeanménil. Enfin il existait une tuilerie à l'Ouest de Rambervillers près du passage à niveau qui se trouve à l'origine de la route de Charmes. L'exploitation est occupée aujourd'hui par ce qui reste du Champ de Tir. C'est à proximité de ce Champ de Tir que l'échantillon ici étudié a été prélevé, au flanc d'une petite route pierreuse qui prend sur la route de Charmes, longe l'ancienne tuilerie et le Champ de Tir et s'enfonce dans les bois en direction de la gare de Romont, sur la ligne abandonnée. Au talus Nord de ce chemin les marnes en plaquettes des « couches grises » du Muschelkalk moyen affleurent.

Le milieu est lagunaire par raisonnement de continuité. On ne voit pas trace à cet endroit de formation saline, si bien qu'on n'a aucune raison de parler de sursalure, mais ainsi qu'on l'a vu page 177, le niveau doit être considéré comme lagunaire dans son ensemble.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'aspect de la roche est celui d'une marne dure et feuilletée qui se délite en plaques résistantes. L'ensemble est gris sombre. On voit l'alternance de feuillets plus épais et calcaires et de feuillets minces *exclusivement argileux*.

Au microscope, la texture normale à la stratification apparaît cyclique. Alternent des zones plus détritiques et calcaires, et des

zones exclusivement argileuses. La texture parallèle à la stratification dans une zone peu détritique est homogène et floconneuse. La matière argileuse est groupée en sphères isotropes autour desquelles des cristaux de calcite font une auréole. Les grains de quartz sont visibles; ils ont des formes irrégulières, leur taille varie de 15 à 50 μ ; le diamètre moyen est de 30 μ . La calcite est sous deux formes, ou bien en cristaux isolés d'une dizaine de μ ou bien en agrégats de 100 à 200 μ . Les minéraux accessoires visibles sont des grains opaques et de la limonite diffuse assez abondante. La roche ne se délite pas et n'a pu être lavée.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'analyse de la roche a porté par hasard sur une plaquette qui correspond à la zone où on ne trouve aucune trace de calcaire. Les résultats sont donc les suivants :

L'échantillon ne contient ni calcite, ni dolomie, ni sels solubles dans l'eau. Par contre on dose 4,8 % d'insolubles et 0,46 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 8,1.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

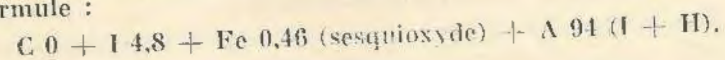
Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argileuse non calcaire en milieu lagunaire non sursalé.

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 14,2.f floue — 10.TF — ombre entre 14 et 10 — 5.AF — 3,34.F. (pl. V, 5).

Le résultat de cet essai montre que la phase argileuse extraite de la roche contient de l'illite largement dominante et probablement hydratée pour une part, avec un peu d'Hydrobiotite. On dose ainsi 100 % de minéraux micacés.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire non sursalé. Les conditions de sédimentation correspondent à une boue non calcaire. Le pH est 8,1 et la formule :



— 30 —

MUSCHELKALK SUPÉRIEUR DAMELEVIÈRES (Meurthe-et-Moselle) Marne verte

*Illustration : Analyse chimique, tableau 8.
Analyse thermique, figure 8, courbe III.
Spectre planche V, figures 6 et 7.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans une excavation faite pour asseoir les fondations d'une maison en construction à Damelevières, près de Blainville (M.-et-M.). Le raisonnement géométrique conduit à considérer ce niveau comme appartenant à la Lettenkohle, qui termine le Muschelkalk. La Lettenkohle en Lorraine présente une multitude de faciès qui vont des dolomies en plaquettes à des marnes vertes en passant par des calcaires jaunes et sableux, le tout présentant des couches à plantes et des niveaux ligniteux. L'ensemble représente une régression sensible par rapport à la pleine mer du Muschelkalk. Il est juste de dire que le phénomène n'est pas brusque et qu'avant que s'installe le régime lagunaire du Keuper, les hésitations de la mer sont nombreuses. Des niveaux à fossiles marins ont pu être trouvés et décrits (74). Le milieu de genèse est donc extrêmement variable : c'est grosso modo celui d'une mer en régression. Les conditions de sédimentation sont elles aussi variables de niveau en niveau, tantôt analogues à celle de la sédimentation marine, tantôt en voie de sursalure, tantôt en voie de dessalure. Le niveau de marne verte où l'on a prélevé cet échantillon est azoïque et prudemment, avant l'examen pétrographique, on doit imaginer les conditions de sédimentation comme situées entre celles de la mer et celles d'un lagune non sursalée.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une marne verte grumeleuse. Aucune structure n'est visible, soit parce que la roche n'en a pas, soit parce que toute structure a disparu à proximité de la surface du sol dans le gisement. Rien n'est visible à l'œil nu.

Au microscope l'aspect est celui d'une marne. La texture ne varie pas avec l'orientation et montre un aspect nettement flocon-

neux de la phase argileuse avec grains de glauconie nombreux. La phase carbonatée est discrète; elle consiste en grains de calcite isolés ayant leurs formes rhomboédriques et 5 μ de diamètre, le plus souvent. Ils se répartissent plus volontiers autour des flocons argileux qui apparaissent en sphères isotropes. Le quartz est invisible. Par contre on remarque un assez grand nombre de grains de glauconie. On peut compter trois grains de 30 à 100 μ par champ, et leur aspect est le plus habituel. On remarque aussi quelques plages de limonite, et certaines semblent provenir d'une altération de la glauconie.

Le lavage a donné quelques valves d'Ostracodes et quelques cristaux d'oligiste.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 9,8 % de calcite et pas de dolomite; 1,7 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau, 2 % de glauconie et 0,32 % de fer. Le pH est 7,5.

Les seules considérations stratigraphiques n'avaient pas permis de définir les conditions de sédimentation du niveau où l'échantillon a été prélevé dans le milieu de genèse si variable de la Lettenkohle lorraine.

Après l'étude pétrographique les choses se précisent un peu puisque la glauconie est présente; on peut donc parler de conditions de sédimentation lagunaire mais peu différentes de celles du milieu marin puisque la glauconie a pu se former.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Quatre diagrammes de Rayons X ont été faits; le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension à l'ammoniaque; les lignes mesurées sont :

9,85.TF — ombre à l'intérieur de l'anneau entre 14 et 9,85 — 7,1.tf. et floue — 5.m et floue — 4,27.tf — 3,58.tf — 3,33.TF. (pl. V, 6).

Le deuxième spectre a été fait sur une poudre : a) traitée à l'acétate de sodium et au chlorure de calcium; b) et séchée au benzène. Ce traitement était destiné à faire apparaître une raie à 14 A° à partir de l'ombre centrale. Le résultat est le suivant :

10.TF — 5.f — 4,47.TF — 3,34.F; aucune raie à 14 A° n'apparaît (pl. V, 7).

Le troisième spectre a été fait sur une plaquette traitée au glycérol. Les lignes mesurées sont les suivantes :

10.F et floue — 5.f et floue — 3,33.F et floue. La raie à 17 A° et ses harmoniques n'apparaissent pas.

Le quatrième spectre a été fait comme témoin sur le même matériel et dans les mêmes conditions que le précédent et lui est identique. Ceci montre que la Montmorillonite n'existe pas dans les mélanges.

Ainsi les essais complémentaires ne changent pas la diagnose faite sur le premier spectre. La phase argileuse extraite de cette roche ne contient que de l'illite avec une légère trace de Kaolinite. Quand on sait la netteté de la raie de base de ce dernier minéral, la faiblesse de celle qu'on peut observer sur le premier spectre décrit ici montre que la Kaolinite n'est présente que pour quelques unités pour cent. D'ailleurs sur les spectres n° 2 et 3 elle n'apparaît pas du tout et sur le n° 4 on ne voit qu'une ombre à peine discernable sur son emplacement. La conclusion est que la phase argileuse extraite de la marne de la Lettenkohle contient tout près de 100 % de minéraux micacés représentés principalement par l'illite, et peut-être un peu d'Hydrobiotite.

L'analyse thermique a été étudiée page 112 et représentée figure 8, courbe III. La courbe obtenue est presque identique à celle qu'on a pu faire avec l'illite dite de Penssylvanie. Le crochet endothermique à 500° est bien visible. Cet essai confirme la diagnose aux Rayons X.

L'analyse chimique, dont le résultat se trouve dans le tableau 8, page 122, indique un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 4,68$. La proportion de

potasse et de magnésie y est de 7,15 et 0,71. Cette teneur en magnésie est particulièrement faible pour un minéral heptaphyllite sédimentaire, surtout s'il est mêlé à un peu d'Hydrobiotite. En admettant que toute la phase argileuse soit constituée de minéraux à réseaux micacés, le calcul de la formule donne le résultat suivant :

$$(\text{OH})_2 (\text{Al}^{0,83}\text{Fe}^{0,28}\text{Fe}^{0,08}\text{Mg}^{0,66}) (\text{Si}^{3,60}\text{Al}^{0,40}) \text{O}_{10} (\text{Ca-K-Na})_{1,41}$$

5° CONCLUSION.

Les dépôts de la Lettenkohle sont dans l'ensemble lagunaires. La marne verte ici étudiée est azoïque et verte et on n'a aucune raison de ne pas la considérer comme un dépôt lagunaire non sur-salé. Cependant la présence de la glauconie montre que les conditions de sédimentation ne sont pas forcément très éloignées de celles de la mer dont ce minéral est caractéristique. Le pH est 7,5. La formule représentative de la roche est : C 9,8 + I 1,7 + Glauconie 2 + Fer 0,32 (sesquioxyde) + A 88 (I).

KEUPER INFÉRIEUR
BAINVILLE-AUX-MIROIRS (Meurthe-et-Moselle)
Marne verte

*Illustration : Analyse chimique, tableau 8.
Analyse thermique, figure 8, courbe IV.
Spectre planche V, figure 8.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé dans une ancienne exploitation de gypse à proximité de Bainville-aux-Miroirs, qui se trouve sur la route de Nancy à Charmes, 10 km. au Nord de cette ville. La carrière montre un très bel exemple de Keuper inférieur où les bancs de gypse et les niveaux argileux alternent rapidement. Les marnes sont bariolées. Un échantillon de marne stratifiée entre deux bancs de gypse a été prélevé de façon à bénéficier d'un échantillon dont on puisse affirmer la genèse en milieu sursalé. Il n'est pas besoin en effet de préciser le caractère lagunaire du Keuper inférieur en Lorraine puisque ce niveau est souvent nommé le Saliférien, où le sel est exploité. Nous pouvons donc parler ici de conditions de genèse telles que celles qui règnent dans un bassin lagunaire sursalé.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est gris-vert. Elle a l'aspect d'une marne dont la masse paraît finement feuilletée. De petites cristallisations de gypse parsèment la masse de la roche.

Au microscope, l'aspect est celui d'une marne où la phase calcaire est assez abondante pour masquer en grande partie la phase argileuse. La texture ne varie pas avec l'orientation et la phase argileuse paraît complètement isotrope. La calcite est formée de grains rhomboédriques très réguliers de 3 à 5 μ de diamètre. A noter de temps à autre de petites géodes de calcite où celle-ci, largement développée en cristaux de 50 à 100 μ , s'organise en jeu de patience. On ne voit pas de quartz. Les minéraux accessoires sont le gypse et quelques agrégats de limonite.

Le lavage a donné quelques grains de quartz et une profusion de rhomboèdres aplatis qui font effervescence sous la loupe binoculaire.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'échantillon analysé a été trié à la pince sous la loupe binoculaire pour séparer autant que possible la roche argileuse du gypse qui y est mêlé. La prise ainsi réalisée contient 22,7 % de calcite et pas de dolomite, 3 % d'insolubles, et 6 % de gypse, 0,42 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,7.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'un milieu lagunaire sursalé. Cinq diagrammes ont été faits. Le premier spectre a été réalisé sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont :

15.TF — 10.F — 7,2.f — 5,05.m — 4,50.f — 4,27.f — 3,59.tf — 3,36.TF (pl. V, 8).

Le deuxième spectre a été fait sur une plaquette traitée au glycérol. Une raie centrale apparaît d'un seul côté de la tache; il est difficile de calculer l'écart réticulaire auquel elle correspond, mais elle est certainement supérieure à 15 Å° et sans doute voisine de 17 Å°.

Le troisième spectre a été fait sur le même matériel et dans les mêmes conditions sans traitement au glycérol. Son aspect est identique sauf que la raie centrale est à 15 Å°.

Le quatrième spectre a été fait sur une plaquette préparée à l'ammoniaque et chauffée à 250°. La raie à 15 Å° devient beaucoup plus faible.

Le cinquième spectre a été fait sur une plaquette préparée à l'ammoniaque et chauffée à 500°. La raie à 15 Å° passe à 12 Å° et est très atténuée. La raie à 7 Å° est bien entendu disparue totalement.

L'ensemble de ces documents montre la coexistence dans le mélange de la Montmorillonite, de l'Illite et de traces de Kaolinite. La Montmorillonite domine nettement sur l'Illite.

L'analyse thermique a été interprétée page 112 et représentée figure 8, courbe IV. Cette courbe montre une inflexion endothermique à 500° qu'on peut attribuer à l'Illite. Par contre aucun crochet de la Montmorillonite n'apparaît.

SiO₂

L'analyse chimique montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,29$. La quan-

tité de potasse et de magnésie est de 3,21 et 13,29 g. pour 100 grammes de silicate déshydraté. (Voir Tableau 8).

Ces chiffres sont fort différents de ceux qui ont été trouvés habi-

tuellement. Il faut en voir la raison dans la présence de la Montmorillonite qui représente au moins 50 % du mélange et que ce minéral est beaucoup plus pauvre en potasse que le mica. Par contre elle est souvent beaucoup plus riche en magnésie. Cette dernière paraît bien être silicatée. En effet ;

1° L'attaque brutale à HCl normal ne donne que 0,16 % de magnésie;

2° Le spectre de Rayons X sur la phase argileuse livrée à l'analyse chimique ne donne pas les raies de la dolomite;

3° Même si la dolomite avait échappé à l'analyse chimique on devrait trouver dans cette analyse, avec la magnésie, la chaux de ce minéral. Et ce n'est pas le cas.

En somme, l'étude de cette roche difficile à déterminer permet, dans l'état actuel des critères utilisés, de dire que la phase argileuse est composée de Montmorillonite dominante, d'Illite et d'une très faible trace de Kaolinite.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire et sursalé. Le pH est 7,7. La formule représentative de la roche est :

C 22,7 + I 3 + Gypse 6% + Fe 0,42 (sesquioxyde) + A 70 (M + I >>>>>> K).

— 32 —

KEUPER INFÉRIEUR ROSIÈRES-AUX-SALINES (Meurthe-et-Moselle) Marne à Gypse

*Analyse chimique, tableau 8.
Graphique, figure 2.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé sur le trajet de l'autostrade en construction Paris-Strasbourg destiné à éviter sur ce parcours les agglomérations de Nancy et du groupe des industries liées au sel, de la région de Dombasle. Entre Saint-Nicolas-de-Port et Rosières-

aux-Salines, l'autostrade entaille la colline et le Keuper inférieur apparaît présentant les marnes bariolées qui le caractérisent. Le mot bariolé est parfaitement justifié puisqu'on peut voir des marnes ou argiles, rouges, vertes, bleues, jaunes, violettes et même noires. Des lentilles de gypse irrégulières parcourent le gisement. Un échantillon de celles-ci a été prélevé alors qu'il présentait de fines intercalations marneuses dans son sein. Cette marne a pu être prélevée à la pince dans la masse du gypse. On a de nouveau ici un cas de milieu lagunaire sursalé typique.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'échantillon consiste donc en minces plaques d'une marne verte interstratifiée dans une amygdale de gypse saccharoïde. L'aspect est celui d'une marne feuilletée. Rien n'est visible à l'œil nu ou à la binoculaire.

La taille de la plaque mince a échoué car pendant le polissage du gypse les débris marneux pris normalement à leur stratification se sont dégagés et seul le gypse est resté visible en plaque mince. Ce dernier apparaît avec une structure grenue où les cristaux maclés ont souvent leur forme cristalline et sont orientés en tous sens. Le lavage n'a pas été possible à cause de la trop grande quantité de terre nécessaire.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La prise qui a été analysée a donné les composants suivants. Cette prise contient 36,1% de calcite; 14,45 % de dolomite; 1,8 % d'insolubles; 4 % de gypse et 0,50 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,8.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

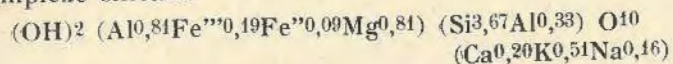
Le diagramme a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes :

9,9.TF — ombre à l'intérieur du cercle soulignée à 11 A° — 5,05.f — 4,49.f — 4,29.m — 3,36.F. Ces mesures montrent que la phase argileuse est constituée exclusivement de minéraux micacés où l'Illite est de beaucoup la plus abondante.

SiO₂

L'analyse chimique montre — = 5,52. La proportion de Sesq potasse et de magnésie est de 5,83 et 9,61 g. pour 100 grammes de silicate déshydraté. Cette magnésie ne peut être attribuée à un

résidu de dolomite dans la phase argileuse livrée à l'analyse chimique, que pour une très faible part. En effet la chaux est beaucoup moins abondante que la magnésie et les raies de la dolomite dans les spectres sont visibles, mais extrêmement faibles. La phase argileuse extraite de la marne de Rosières-aux-Salines étant composée exclusivement de minéraux micacés, on peut calculer la formule chimique de ce complexe silicaté.



Cette formule est très semblable à celle qui a été calculée pour Housseras et montre un nombre voisin et trop faible d'ions en position octaédrique. De même la somme des ions en position intermédiaire y est de 0,87 et voisine de celle qu'on trouve à Housseras et qu'on trouve dans la série des micas heptaphyllites d'origine sédimentaire.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire et sursalé. Le pH est 7,8. La formule représentative de la roche est :

C 26,1 (cal) 14,45 (dol) + I 1,8 + Gypse 24 % + Fe 0,5 (sesquioxyde) + A 33 (I >>>> H).

—33 et 34—

KEUPER SUPÉRIEUR DOMJULIEN (Vosges)

Marnes dolomitiques rouge et verte

*Illustration : Analyse chimique, tableau 8.
Spectre planche V, figure 9.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Ces échantillons ont été prélevés sur le flanc d'une colline portant une statue de Notre-Dame, au Sud de Domjulien, village situé à une dizaine de kilomètres au Nord de Vittel (Vosges). Au flanc de cette colline, affleurent des calcaires argileux alternant avec des marnes de couleur tantôt verte, tantôt violette. Le ruissellement empêche la formation de terre végétale et la colline montre dans chacun des ravinements qui la parcourent, l'alternance de ses assi-

ses. L'ensemble appartient au Keuper supérieur qui est une formation lagunaire souvent sursalée, ainsi qu'en témoignent de fréquentes intercalations gypseuses. Ici, les produits salins ne sont pas visibles mais le milieu est dolomitique, ainsi que nous le verrons plus loin. On définira ce milieu comme lagunaire magnésien (Bibliographie : BLEICHER, 29 (1897); JACQUOT, 185 (1868); CORROY, 74; LEVALLOIS, 234; MINOUX, 291; RICOUR, 327; MINOUX et RICOUR, 292).

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Les échantillons étudiés sont durs et à cassure irrégulière. Ils ne forment boue avec l'eau qu'à la suite d'un contact prolongé. Ils ont l'aspect d'un calcaire argileux. Ils sont rouges et verts mais la limite n'est pas régulière : si grosso modo un niveau vert succède à un niveau rouge, la limite entre ces deux couleurs est comme celle d'un nuage et des lobes rosés se perdent dans la matière verte et réciproquement.

Au microscope, les deux roches sont identiques. L'aspect général est celui d'un calcaire. La texture ne dépend pas de l'orientation et est complètement homogène. La phase argileuse est masquée, sauf dans les biseaux de la lame mince où les grains de carbonates ne sont plus visibles que sur une faible épaisseur et laissent voir un fond isotrope.

Le carbonate apparaît en grains très uniformes de 5 à 7 μ et dont les formes sont rhomboédriques. De temps à autre on remarque une petite géode de carbonate. Le quartz est très dispersé et assez gros, de 60 à 100 μ , isolé dans la mosaïque carbonatée. On ne voit comme minéraux accessoires que quelques petits cristaux de gypse. La roche rose paraît teintée au microscope mais on ne sait à quoi attribuer cette teinte légère. L'élément qui la provoque est diffus dans la roche.

Le lavage de la roche montre au milieu de morceaux de roches désagrégées, quelques cristaux de gypse; on ne voit aucune trace d'organismes.

3° ANALYSE DES ROCHES.

La marne rouge contient 28 % de calcite et 32 % de dolomite; 2 % d'insolubles et des traces de gypse (environ 5 0/00); enfin, 0,2 % de fer sous forme de sesquioxyde. Le pH est 8,2.

La marne verte contient 10 % de calcite et 51 % de dolomite; 2,2 % d'insolubles; 1 % de gypse et 0,22 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,9.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation peuvent être considérées comme celles d'une lagune magnésienne non franchement sursalée. Les diagrammes de Rayons X donnent les renseignements suivants :

Le premier spectre concerne la marne rouge. C'est un spectre de poudre qui montre un anneau à 10 Å flou, ainsi que les raies de la calcite et de la dolomite.

Le deuxième spectre a été fait sur une fraction argileuse de la marne rouge beaucoup plus fine et longuement lessivée, qui a donné une plaquette par sédimentation à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 9,85.TF avec ombre vers l'intérieur — 4,95.m — 4,29.f et circulaire — 3,33.TF (pl. V, 9).

Le troisième spectre concerne la marne verte. C'est un spectre de poudre qui donne un anneau à 9,80 flou, avec une ombre à l'intérieur et une raie à 4,46 très faible.

Le résultat de ces essais montre que la phase argileuse est exclusivement composée d'illite probablement hydratée pour une part.

L'analyse chimique montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ égal à 4,13 et

4,21 pour la marne rouge et la marne verte. La proportion de potasse est respectivement de 7,16 et 5,99; celle de magnésie est de 3,85 et 4,49 pour 100 grammes de silicate déshydraté. Pour ce qui est de l'oxyde ferrique, on peut remarquer sur le tableau n° 8 que la marne rouge est à peine plus abondante en Fe_2O_3 que la marne verte.

En admettant, ce qui paraît ici certain, que la phase argileuse soit composée exclusivement de minéraux micacés, on peut calculer la formule du silicate correspondant. Le résultat est le suivant :

Marne rouge : $(\text{OH})_2 (\text{Al}_{1,08}\text{Fe}^{+++0,35}\text{Fe}^{++0,05}\text{Mg}^{0,37}) (\text{Si}_{3,66}\text{Al}_{0,34}) \text{O}_{10}$
 $\text{Ca}_{0,08}\text{K}_{0,65}\text{Na}_{0,37}$

Marne verte : $(\text{OH})_2 (\text{Al}_{1,20}\text{Fe}^{+++0,29}\text{Fe}^{++0,17}\text{Mg}^{0,38}) (\text{Si}_{3,65}\text{Al}_{0,35}) \text{O}_{10}$
 $\text{Ca}_{0,33}\text{K}_{0,40}\text{Na}_{0,14}$

Le nombre d'ions en position octaédrique est de 1,85 et 2,04 au lieu de 2 dans la formule théorique. Il est évident que le rôle des impuretés dans le matériel fourni à l'analyse chimique, et en particulier des cations adsorbés, doit expliquer les anomalies de ces formules structurales.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argileuse riche en calcite et en dolomite et non nettement sursalée. Le pH est 8,2 et 7,9. Les formules caractéris-

tiques de ces roches sont :

Marne rouge :

C 28 (cal) 32 (dol) + I 2 + Fe 0,2 (sesquioxyde) + A 37 (I).

Marne verte :

C 10 (cal) 51 (dol) + I 2,2 + Fe 0,22 (sesquioxyde) + A 35 (I)

— 35 —

JURASSIQUE
 DJEBEL GHASSOUL (Maroc)
 Terre à dégraisser

Illustration : Spectre planche VI, figures 1 et 2.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon provient de la collection du service géologique du Maroc et m'a été communiqué obligeamment par MM. MARCAIS et MORIN. Il provient du Jebel Ghassoul sur le feuille de Ksabi. BARTHOUX (14), qui semble être le seul auteur actuellement à avoir décrit le gîte, parle d'un massif raviné émergeant des tables du jurassique gréseux. Au milieu d'une formation de marnes vertes à gypse et à silex de 30 mètres d'épaisseur, se trouve cette terre à dégraisser, sous forme de lentilles. Le milieu de genèse peut être attribué à une formation lagunaire sans trop d'hésitation, le faciès de marne hariolée, la présence du gypse et aussi la présence de silex tels que ceux que CAYEUX (62) a décrits sous le nom d'accident siliceux en milieu gypseux, sont en faveur de cette attribution. Les conditions de genèse sont donc très probablement celles d'un milieu lagunaire sursalé, sans qu'on sache s'il s'agit de lagunes continentales ou correspondant à une régression marine.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche présente, d'après BARTHOUX, quand on l'extrait, la consistance de la cire et une couleur brune. Après un long séjour au laboratoire elle brunit et durcit. L'échantillon étudié a une consistance cornée, une cassure irrégulière ou esquilleuse, une couleur brune. Sur les surfaces lisses de la roche, apparaissent des sortes de pustules constituées de gypse. Des traînées gypseuses traversent la roche elle-même.

Au microscope, l'examen est difficile. L'ensemble est très désordonné et montre des phyllites assez grandes et groupées en agrégats à extinction commune. On ne voit pas de calcite et seulement quelques grains de quartz. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et nettement cristallines. La phase argileuse est très bien visible et très biréfringente. Les phyllites argileuses sont groupées en paquets de forme arrondie, parfois allongée ou même losangique. Tout se passe comme si les phyllites étaient des produits d'altération de minéraux dont on ne verrait plus aujourd'hui que le fantôme. Il est possible que ce soit la cuisson qui soit responsable de cette sorte de texture fissurée et réticulée. En attendant l'examen de plus nombreuses plaques minces qui sont en confection par des techniques diverses, l'examen microscopique montre dans la terre de Ghassoul une texture et un aspect des phyllites tout à fait différent de ceux qui ont déjà été décrits dans les autres roches sédimentaires. La cristallinité des phyllites est en effet tout à fait notable ainsi que leur arrangement en paquets d'extinction commune.

Le lavage n'est pas possible par la méthode habituelle. La terre mise à gonfler devient grasse mais reste très cohérente. La pression du jet d'eau n'est pas suffisante pour provoquer le passage à travers le tamis de cette masse spongieuse.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche ne contient pas de calcite ni de dolomite.

Le dosage des insolubles montre un résidu égal à 18 % du poids sec qui n'est pas formé de grains de quartz, qui d'ailleurs n'apparaissent pas au microscope. Une étude spéciale est, là aussi, nécessaire pour inventorier cette fraction qui a résisté au traitement habituel. Le pH est 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

La phase argileuse a été extraite par dispersion aux ultrasons en milieu ammoniacal à pH 9. La sédimentation n'a pas permis d'obtenir de bonnes plaquettes mais seulement des sortes d'esquilles plates. Celles-ci ont pu être montées aux Rayons X et ont donné la ligne suivante : 15.TF et floue. L'écartement de cette ligne et son allure faisaient songer à la Montmorillonite (pl. VI, 1).

Un deuxième spectre a été fait sur une des esquilles précédentes, après traitement au glycérol. Un spectre typique des Montmorillonites glycérolées est apparu : 17.5.TF et épaisse — 8,80.m et floue — 5,85.f — 4,48.f — 3,55.f et floue (pl. VI, 2).

L'étude chimique a été faite : a) par DAMOUR. Elle est citée par LACROIX (197) et MIGEON (287); b) par BARTHOUX (19). Ces deux analyses sont les suivantes :

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	H ₂ O	Total :
55	1,20	1,40	28,0	0,04	0,52	—	—	—	10,35	98,98
51,42	0,89	1,04	20,75	2,92	0,56	0,28	0,34	0,80	20,70	99,70

Sur la foi de ces analyses, tous les auteurs cités (DAMOUR, LACROIX, BARTHOUX et MIGEON) ont considéré cette terre à savon comme une magnésite ou sépiolite. L'échantillon que j'ai étudié montre, lui, une Montmorillonite typique qui n'est pas mêlée à d'autres minéraux argileux. Ceci est-il général pour le gîte de Djebel Ghassoul ? l'étude en cours le montrera.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est lagunaire. Le pH est 7,8. La formule représentative n'est pas possible à écrire avant une étude complémentaire nécessitant des méthodes à mettre au point. On peut dire cependant que la phase argileuse extraite de la terre à dégraisser de Djebel Ghassoul est composée de 100 % de Montmorillonite.

— 36, 36 bis et 36 ter —

LUDIEN
MORMOIRON (Vaucluse)
Bentonites

Illustration : Spectre planche VI, figures 3 et 4.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Les échantillons de Bentonite de Mormoiron m'ont été offerts par le Professeur J. DE LAPPARENT et par M. PRAX que je remercie. Ils proviennent de diverses exploitations situées aux environs de Mormoiron (Vaucluse), situé à 13 km. à l'Est de Carpentras. Il existe diverses exploitations. L'une s'appelle la carrière de la Condamine, anciennement exploitée par Arthime Constant, de Carpentras, et où fut prélevé l'échantillon qui permit à J. DE LAPPARENT de définir le minéral Attapulgit type (207). M. PRAX a bien voulu,

de plus, me communiquer deux autres Bentonites. L'une est une marne noire, l'autre une marne verte. Elles furent prélevées dans une carrière située à 1 km au Nord du village et qui fut exploitée autrefois par la Société Française des Argiles Smectiques de Marseille. La formation a été décrite par V. CHARRIN (64, 66). Transgressifs sur le flanc crétacé du Mont Ventoux, se trouvent des sables bigarrés où le rouge domine et qui fournissent des ocre. Cette formation doit être considérée comme l'équivalent des Argiles de Vitrolles, de l'Eocène inférieur. Au-dessus, se trouve un complexe appelé marnes de Jocas, qu'on peut considérer comme ludien inférieur, avec peut-être une base lutétienne. Cette formation est dans l'ensemble marneuse mais contient des lits de calcaires azoïques et des silex jaunes de cire. Au-dessus, se trouvent quelques banes calcaires lacustres à limnées, puis la masse des gypses de Mormoiron, exploitée. Il s'agit des marnes calcaires et gypses de Mormoiron qui sont datés par la faune de Vertébrés ludiens. C'est à la base des marnes de Jocas que se trouvent les lentilles exploitées de Bentonite.

On peut définir le milieu de genèse assez facilement. La formation est continentale car il n'y a aucune trace d'incursions marines, dans toute son épaisseur. Sables et argiles bigarrés de la base sont des dépôts de piedmont faisant suite à une phase tectonique. Puis l'énergie des eaux érosives s'atténue et les dépressions périphériques au massif soulevé se combent. Des lacs s'installent où la sursalure survient de temps à autre. Pendant l'épisode des marnes de Jocas, on peut parler d'un milieu lagunaire. Il n'est pas certain qu'il soit sursalé. CHARRIN (66) qui a examiné le gisement en détail n'y a pas trouvé le moindre cristal de gypse. Il s'agit donc ici d'un milieu lagunaire continental, sans sursalure probable en l'état actuel des connaissances publiées sur ce gisement. Les conditions de sédimentation ne peuvent être plus précisées. Sédimentation argilocalcaire où la formation de silex et de calcaire azoïque montre le caractère lagunolacustre.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Attapulgitite type de Mormoiron* (n° 36). — Cette roche argileuse est blanche avec une légère teinte verte. Elle est rêche au toucher. Quand elle est mise dans l'eau, elle ne forme pas une pâte plastique mais se gonfle et se désagrège spontanément en donnant un produit divisé qui se dépose dans le fond du récipient.

Au microscope, l'aspect général est homogène et extrêmement fin. Une phyllite argileuse occupe tout le champ, parsemée de quelques quartz anguleux. Les textures normale et parallèle à la sédimentation

sont identiques; elles peuvent se qualifier par les deux mots suivants : homogène et cristalline. Sa phase argileuse est formée de phyllites polarisant dans les blancs du premier ordre. Chacune des phyllites de quelques μ de longueur présente l'extinction droite. On ne voit pas de carbonates. Les grains de quartz sont rares, ils ont des formes anguleuses et mesurent de 5 à 60 μ ; la moyenne est vers 30. Les seuls minéraux accessoires sont de petits agrégats ferrugineux sans doute limoniteux. Le lavage n'a rien laissé sur le tamis.

B) *Marne verte de Mormoiron* (n° 36 bis). — Cette roche prélevée au Nord du village appartient sans doute à la même formation. Cette terre fait effervescence aux acides dilués; elle est très fine et vert très pâle. Mise dans l'eau, elle donne spontanément, comme l'Attapulgitite précédente, une bouillie non plastique.

C) *Marne noire de Mormoiron* (n° 36 ter). — Prise dans le même gîte, cette terre est gris-noir. Elle est plus rugueuse et montre des éléments détritiques et fait effervescence aux acides.

Le lavage y révèle, avec de nombreux grains de sable, une multitude de débris de mollusques. Ce détail prouve que la vie était possible dans ce milieu. On doit pouvoir trouver à l'avenir des fossiles entiers permettant de préciser les caractéristiques du milieu. Etant donné ce qui a été dit sur cette série, on serait, au moins pour les marnes noires, plus près du milieu lacustre calcaire que du milieu lagunaire salé.

3° ANALYSE DES ROCHES.

L'Attapulgitite type de Mormoiron ne contient pas de carbonates. Par contre, les marnes verte et noire révélaient respectivement 22,8 et 30,7 % de calcite. Le dosage de la magnésie après attaque complète à l'acide décinormal, donne 2,32 et 1,96 % de MgO. Celle-ci n'est pas carbonatée car le spectre de Rayons X n'indique que les raies de la dolomite. La présence de traces de gypse a été vérifiée. Ces roches contiennent respectivement 2,5, 1,4 et 4,1 % d'insolubles. Les pH sont 8,8, 8,4 et 8,2.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Afin de déterminer les constituants de la masse argileuse extraite de ces roches lagunaires continentales, les diagrammes de Rayons X ont été faits.

Le premier spectre concerne la roche n° 36 où l'Attapulgitite type a été définie par J. DE LAPPARENT. Les lignes suivantes ont été mesurées : Accolade à 12.F floue — cercle à 10,25.TF — 6,42.F — 5,42.m — 4,48.m — 4,29 granuleuse circulaire — 3,35.TF granuleuse circulaire — 3,21.F — 2,62.m floue. Ces lignes sont carac-

téristiques de l'Attapulgite (pl. VI, 3). On peut remarquer que l'anneau central est un peu large puisqu'il correspond à 10,25 au lieu de 10,50 Å; d'autre part, un problème est posé par la paire d'accollades à 12 Å qui doit correspondre à un minéral phylliteux et non aciculaire comme l'Attapulgite. Il est probable que ceci correspond à une légère fraction d'Hydrobiotite présente dans la phase argileuse. Des essais complémentaires d'échange de bases et de chauffage doivent permettre de le démontrer.

L'analyse thermique et l'analyse chimique de l'Attapulgite type de Mormoiron ont été faites par J. DE LAPPARENT (207, 213) et c'est sur elles que furent étayées les définitions de ce minéral.

Le deuxième spectre concerne la marne verte de Mormoiron (n° 36 bis). Il a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 15.TF — 9,9.f — 7,1.f — 5.f et floue — 4,48.tf — 4,27.F et granuleuse — 3,35.TF et granuleuse. Ces lignes montrent la présence de la Montmorillonite largement dominante, avec traces faibles d'Illite et de Kaolinite (pl. VI, 4).

Pour vérifier cette détermination, un troisième spectre a été fait sur une plaquette traitée au glycérol. Les lignes mesurées sont : 15,50.TF — ombre entre 10 et 8,80 — 8,80 floue — 7,1 fine — 5,85.m — 5.tf — 4,48.m — 4,27.f et circulaire — 3,55.F — 2,94.AF. Les écarts réticulaires typiques de la Montmorillonite glycérolée apparaissent ainsi. Seul l'espacement basal est anormal à 15,5 au lieu de 17,7. JACKSON et ses collaborateurs (389 bis) ont montré que dans certaines conditions, un tel écart pouvait se réaliser par le traitement au glycérol.

Le quatrième spectre concerne la marne noire de Mormoiron (n° 36 ter). Il a été réalisé à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Il a donné les lignes suivantes : 15.TF et floue — 10.m et floue — 7,1.f et floue — 6,5.f et floue — 4,5.f et circulaire — 4,29.m et circulaire — 3,59.f — 3,36.F et circulaire. Ces lignes montrent à nouveau la Montmorillonite largement dominante avec des traces de Kaolinite et d'Illite.

Au total, sur trois échantillons de Mormoiron, un seul est de l'Attapulgite et les deux autres sont de la Montmorillonite.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunolacustre et continental. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argileuse faiblement calcaire dans un tel milieu. Les pH sont 8,8, 8,4 et 8,2. Les minéraux argileux caractéristiques de ces roches sont l'Attapulgite type pour le gîte de la Condamine où ce minéral a été défini, et la Montmorillonite

dans les deux terres prélevées non loin de là. Les formules caractéristiques de ces roches sont :

Attapulgite type : C 0 + I 0,9 + Fer 0,18 (sesquioxyde) + A 98 (Att >>>>> 12 Å?).

Marne verte : C 22,8 + I 4,4 + Fer 0,22 (sesquioxyde) + A 76 (M >>>>> I = K).

Marne noire : C 30,7 + I 3,6 + Fer 0,24 (sesquioxyde) + A 65 (M >>>>> I = K).

— 37 —

LUDIEN

CORMEILLES-EN-PARISIS (Seine-et-Oise)

Marne blanche à gypse

*Illustration : Analyse thermique, figure 8, courbe VI.
Spectre planche VI, figure 5.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon est une marne blanche contenant de grands cristaux de gypse fer de lance. Il a été prélevé dans la carrière Lambert de Cormeilles-en-Parisis, en 1946, entre la première et la deuxième masse de gypse. Ceci correspond à ce qui est nommé marnes d'entre deux masses (SOYER, 350; A.-F. DE LAPPARENT, 203; LEMOINE, 233); il s'agit de l'étage Ludien. Cette formation est souvent considérée comme marine dans son ensemble (203) mais le détail (359) permet de croire à de fréquentes intercalations lagunaires. Sauf erreur, le niveau à grands cristaux de fer de lance doit être considéré comme s'étant formé en milieu sursalé. S'agit-il de lac où les eaux de lessivage chargées de sels descendaient ou s'agit-il de lagunes envahies périodiquement par la mer ? les spécialistes (FINATON, 109 et DEICHA, 81 et 82) se partagent entre ces deux hypothèses : il semble certain après les travaux de DEICHA (81) que l'influence des variations saisonnières se faisait sentir sur le dépôt. Quoi qu'il en soit et dans l'ignorance où nous sommes des différences ou des ressemblances entre les milieux de sédimentation qui ont pu se constituer dans le fond d'un lac sursalé ou d'une lagune marine sursalée, nous parlerons de milieu lagunaire sursalé.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Cette marne est blanche; elle finit, sous l'influence des intempéries, par se désagréger. C'est la raison pour laquelle je l'appelle marne, bien que son aspect soit plutôt celui d'un calcaire argileux. L'aspect est un peu celui de la craie et de très grands cristaux bien formés en fer de lance y sont développés. Par ailleurs, dans le même niveau, se trouvent des cavités analogues à des géodes remplies de cristaux bien formés de gypse noir ou mielleux.

La section mince a été faite dans un morceau de roche contenant du gypse. La partie argileuse a disparu dans le polissage. On remarque seulement dans les formes de ce gypse des cristallisations de carbonate alignées les unes au bout des autres sur plusieurs millimètres. Il est curieux de remarquer que tous les cristaux de carbonate s'éteignent ensemble, comme si l'orientation des cristaux avait été guidée par leur support.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 52 % de calcite et 14 % de dolomite; 2 % d'insolubles et 7 % de gypse sur la prise faite après élimination des grosses cristallisations de gypse. Le pH est 7,6.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue calcaire et dolomitique avec une sursalure nette. Les diagrammes des Rayons X donnent les résultats suivants :

Le premier spectre a été fait après un traitement ménagé sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes suivantes ont été mesurées : Anneau à 10,25.TF — 6,42.m — 5,44.f — 4,50.m et circulaire — 3,69.f — 3,35 granuleuse — 3,23.F. Ces raies caractérisent l'Attapulгите. On trouve ensuite celles de la Dolomite et de la Calcite.

Le deuxième spectre a été fait après une attaque ménagée mais très prolongée pour éliminer les carbonates. La sédimentation a été très longue, de façon à obtenir une fraction inférieure à 0,5 µ. Les lignes mesurées sont les suivantes : 10,25.TF — 6,44.F — 5,46.m — 5,05 floue — 4,50.AF — 3,69.f — 3,35.AF — 3,23.F — 2,62.F — 2,15.F. Ces lignes caractérisent l'Attapulгите (pl. VI, 5) et l'on peut remarquer parmi elles celles à 5,05 et 3,35 A°, qui ne sont pas circulaires et qui indiquent par conséquent la présence d'un minéral phylliteux. Celui-ci doit être l'illite qui serait aussi responsable de l'épaississement du cercle de l'attapulгите à l'équateur du spectre. Les lignes de la dolomite et de la calcite ont disparu.

En conclusion, la phase argileuse extraite de la marne blanche à gypse de Cormeilles-en-Parisis contient de l'Attapulгите largement dominante et une petite fraction de minéral micacé. On doit remarquer l'absence complète de la Kaolinite.

L'analyse thermique montre un premier départ d'eau à 130°, un deuxième à 370°, un troisième à 460° et l'allure générale de la courbe représentée fig. 8, courbe VI, confirme la diagnose aux Rayons X. Le brusque crochet à 700° correspond à la présence de carbonates dans la poudre.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argileuse, calcique et magnésienne et, de plus, sursalée. Le pH est 7,6. La formule caractéristique de la roche est : C 52 (Cal) 14 (Dol) + I 2 + Gypse 7 + A 25 (Att>>>>>> I).

— 38 —

SANNOISIEN INFÉRIEUR CORMEILLES-EN-PARISIS (Seine-et-Oise) Marne bleue

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé dans la même carrière de Cormeilles-en-Parisis que l'échantillon précédent mais dans la masse des marnes bleues qui appartiennent au Sannoisien inférieur. Les auteurs (350, 203, 233) sont d'accord pour y voir subsister des conditions de salure accusées. Les intercalations gypseuses y sont très abondantes mais quand les eaux se dessalaient, un petit crustacé dont on a trouvé les restes fossiles pouvait y vivre. L'aspect des marnes bleues est extrêmement variable le long des 8 m. 80 que mesure ce niveau. La locution utilisée par LEMOINE pour évoquer les conditions de sédimentation de ces marnes bleues est celle de marais salants. On se trouve vraisemblablement en milieu lagunaire sursalé.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Cette marne est d'un joli bleu pâle dans son ensemble. Elle est litée; le premier examen montre qu'elle est finement stratifiée, avec

une texture souvent lenticulaire. Parmi les petites zones qui alternent, on peut distinguer plusieurs sortes. Les plus épaisses et les plus abondantes sont faites de marne bleue; les autres, fines et régulières, apparaissent à la binoculaire comme de minces bancs de gypse saccharoïde. D'autres, enfin, sont des petites lentilles à grains plus grossiers et plus calcaires, contenant encore du gypse. L'examen à la loupe binoculaire m'a montré 2 grains de glauconie, ce qui semble prouver que ce minéral peut résister à une salure assez accentuée.

Pour l'examen microscopique, la lame mince a été taillée parallèlement à la stratification dans une zone marneuse. L'aspect est celui d'une marne où les éléments calcaires et argileux se partagent la place. La texture est très homogène. La phase argileuse est cryptocristalline, d'aspect plus moucheté que lamellaire. Les cristaux de calcite sont très bien calibrés. Ils sont tellement fins qu'il est difficile d'être sûr que leur forme est rhomboédrique comme il le semble. Ils ont 2 à 3 μ . Pas de quartz visible.

Le lavage a donné une masse de cristaux de gypse bien formé, une dizaine de grains de pyrite, quelques rares grains de quartz et un morceau de coquille calcaire de lamellibranche aux côtes divergentes qui permet à la fois de conclure que la vie était possible en ces lieux et que des fossiles entiers peuvent un jour être trouvés.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 35 % de calcite et pas de dolomite (0,12 % de magnésie après l'attaque acide); de plus, on peut doser 1,7 % d'insolubles sur l'échantillon qui a été trié dans un lit très marneux et 2 % de gypse ainsi que 0,2 % de fer sous forme de pyrite. Le pH est 7,7.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les diagrammes de Rayons X ont donné les résultats suivants :

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 9,85.TF avec une ombre au centre — 7,15.m — 5.AF — 4,46.f et circulaire — 3,58.f — 3,33.TF.

Le deuxième spectre a été fait sur une poudre après traitement à l'acétate de sodium et au chlorure de calcium et séchage au benzène. Les lignes mesurées sont les suivantes : 10.AF — 4,50.TF. Aucune raie à 14 Å n'est apparue. Le résultat de ces essais montre que le mélange contient de l'illite hydratée pour une part et de la kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est évaluée à 10 % au maximum.

Le milieu est lagunaire et faiblement sursalé. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilocalcaire. On peut remarquer de plus que la vie était possible dans ce milieu, comme le prouvent les débris de coquilles et la formation d'un peu de pyrite par fermentation anaérobie à partir de matières organiques. Cette pyrite est sans doute responsable de la couleur bleue. Le pH est 7,7 et la formule caractéristique de la roche est :

C 35 (Cal) + I 1,7 % + Gypse 2 % + Fe 0,2 (Pyrite) + A 61 (I>>>>K).

— 39 —

SANNOISIEN PECHELBRONN (Bas-Rhin) Marne rubanée

*Illustration : Photo plaque mince planche II, figure 2.
Spectre planche VI, figure 6.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon a été prélevé en 1948 au cours d'une visite au champ pétrolifère de Pechelbronn, dans les galeries du siège Le Chambrier (puits VI). Cet échantillon est une marne rubanée des couches inférieures de Pechelbronn, qui sont considérées comme du Sannoisien inférieur. Voici ce qu'on peut dire sur les conditions de sédimentation (SCHNAEBELE, 345; GILLET, 121; THEOBALD, 360; DENIZOT, 89 bis). On peut d'abord éliminer le milieu marin. SCHNAEBELE (345) écrit : « Les couches de Pechelbronn se présentent comme un ensemble hétérogène de sédiments multicolores bigarrés, d'une extrême diversité de constitution pétrographique, d'origine lagunaire, déposés dans les eaux saumâtres, salées, douces ou sursalées. Nous évitons d'écrire eaux marines car à aucun moment il n'y a eu de régime marin à proprement dire. Si temporairement la salure des eaux a pu être celle de l'eau de mer, il ne s'est agi que d'épisodes fugitifs au cours des oscillations de la salure. » Le milieu marin étant éliminé, il n'est pas toujours facile de définir le milieu de sédimentation d'un niveau donné s'il n'est pas — ce qui est fréquent — fossilifère. Les couches inférieures de Pechelbronn

sont extrêmement variées : les niveaux lagunaires, limniques ou saumâtres alternent. Le niveau où l'échantillon a été prélevé est un épais niveau de marnes rubanées, qui laisse de-ci de-là perler la matière bitumineuse. En l'absence des données précises que seul le spécialiste pourrait proposer, on qualifiera le milieu de genèse : milieu lagunaire *non sursalé*.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La marne de Pechelbronn est qualifiée de rubanée. En effet, son examen macroscopique montre une alternance indéfiniment répétée de zones d'aspect divers. Les couleurs varient du gris au violacé en passant par le vert et tous les intermédiaires. L'épaisseur des zones est très variable et varie du millimètre au centimètre. Le toucher est variable aussi, tantôt doux, tantôt rugueux pour les zones plus calcaires ou plus détritiques. Généralement, chaque ruban est très irrégulier dans sa largeur et il est rare de pouvoir le suivre longtemps. Les épaisseurs varient et les terminaisons en biseau sont fréquentes. On peut parler de structure lenticulaire si l'on sait que les lentilles sont très longues et très aplaties.

Au microscope, 5 plaques minces ont été examinées. L'aspect général est celui que l'examen macroscopique laissait prévoir : alternance de bandes plus ou moins fines, plus ou moins détritiques. Il faut ajouter de plus que certains rubans sont imprégnés de bitume qui s'éclaire d'une couleur rouille intense.

La texture normale à la stratification est stratifiée. Les variations sont infinies; on peut voir des strates analogues à un grès argileux, d'autres presque exemptes de quartz, d'autres plus calcaires, d'autres presque schisteuses. Une section mince faite dans une zone très argileuse a attiré spécialement l'attention. La texture parallèle à la sédimentation est homogène. Quelques grains de calcite s'éclairent sur un fond argileux presque isotrope. Mais de-ci de-là, apparaissent des grains de glauconie dont certains sont figurés planche II, fig. 2. La présence de la glauconie est curieuse dans un dépôt pour lequel les stratigraphes ne conçoivent pas d'influence marine. Il est probable qu'on se trouve dans le cas prévu par SCHNAEBELE, où la salure des eaux converge vers celle du milieu marin. Il faut reconnaître que cette glauconie paraît accidentelle car je ne l'ai trouvée jusqu'ici que dans une seule zone de la marne rubanée de Pechelbronn.

Le lavage a donné un résidu granuleux dont la moitié est formée de pyrite, l'autre moitié est formée de débris de roche non désagrégée, de quelques grains de calcite et de quartz. La présence de la pyrite ici est importante. En effet, ceci montre que dans la

marne une fois sédimentée, un milieu réducteur s'est installé, capable de produire la pyrite par les fermentations sulfureuses déjà envisagées. Aussi, le terme de lagune qu'on utilise pour désigner un tel dépôt s'applique, pour l'échantillon étudié ici, à une sorte de grand marécage où les eaux recevaient des apports variant très rapidement. Une vase organique se déposait où des fermentations se produisaient, en milieu réducteur. Dans un tel milieu, la genèse des sapropèles qui sont à l'origine des matières bitumineuses pouvait se faire. Il n'est pas sûr qu'elles se sont *en fait* formées in situ, puisque l'origine autochtone de ces matières à Pechelbronn n'est pas démontrée.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'échantillon analysé a donné 23,5 % de calcite et pas de dolomite; la proportion de magnésie, dosée après l'attaque acide, est de 2,32 % mais elle n'a pas été considérée comme silicatée car les raies de la dolomite n'apparaissent pas sur le spectre des Rayons X. On peut doser, de plus, 15 % d'insolubles et 0,62 % de fer sous forme de pyrite. Il n'y a pas de sels solubles dans l'eau. Le pH est 8,2.

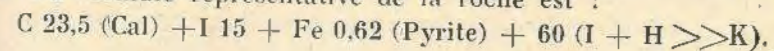
4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase argilo-calcaire riche en pyrite.

Le spectre de Rayons X a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont : 14.f — ombre entre 14 et 9.9 — 9.9.F — 7.15.AF — 5.m — 4.70.tf — 4.46.tf — 4.27.tf — 3.59.m — 3.34.TF. Cet essai montre la coexistence, dans le mélange, des minéraux du groupe de la Chlorite, de l'Hydrobiotite, de l'Illite sans doute hydratée pour une part et de la Kaolinite. L'Illite est largement dominante et proportion de Kaolinite est évaluée à 30 %.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire et vaseux. Les conditions de sédimentation sont celles d'une vase argilocalcaire et pyriteuse. Le pH est 8,2. La formule représentative de la roche est :



— 40 —

SANNOISIEN
MULHOUSE (Haut-Rhin)
Marne à ClNa

1° PALÉOGÉOGRAPHIE DES COUCHES DE POTASSE D'ALSACE.

Les couches productives sont du Sannoisien. Réunissant les indications des spécialistes (QUIEVREUX, 323; GILLET, 121; MAIKOWSKI, 259; MEYER, 283; DEICHA, 83; DENIZOT, 89 bis), on peut considérer que ces sels ne sont pas dus à des incursions marines. L'influence des variations saisonnières y est pourtant très sensible (83) mais elle peut être aussi nette en régime lagunaire isolé de la mer qu'en régime lagunaire lié à la mer. Les sels auraient été apportés par des eaux continentales lessivant des gîtes permien et triasiques et provoquant le dépôt dans les lagunes, dans les périodes de sécheresse. Les marnes qui ont été étudiées ici sont mêlées à du chlorure de Na cristallisé. On peut donc parler pour elles de milieu lagunaire sursalé.

2° MARNE A ClNa DE MULHOUSE.

Cet échantillon provient d'un morceau de carotte de sondage. Cette carotte provient d'un forage fait dans le champ du Siège Anna, dans l'angle des routes Boutzwiller-Pulversheim et Wittelsheim-Pulversheim. (DP XX). Sous la zone de fracture rencontrée vers 600 mètres de profondeur, l'échantillon montre l'union intime de sel gemme cristallisé et d'une marne grise.

3° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche incluse dans la carotte de sel gemme apparaît en lentilles dans la masse de celui-ci. Elle est grise, fait effervescence à l'acide dilué.

Au microscope, l'échantillon de roche qui a été taillé à tout à fait l'aspect d'un calcaire. La surface de la section mince se partage entre plusieurs zones arrondies à grain fin, séparées par des remplissages cristallins. Les parties fines sont formées d'un calcaire à microcristallisations de calcite en grains isodiamétriques très fins (quelques μ). Les parties de remplissage sont formées de cristaux allant de 100 μ à 1 mm et qui sont principalement de la calcite, de l'anhydrite et rarement du gypse. La phase argileuse est complètement masquée. Il est possible qu'une telle roche soit en fait rema-

niée; en raison des mouvements si fréquents dans les séries salines, la roche a été fragmentée puis recimentée. C'est donc une sorte de brèche qui apparaît au microscope. Le lavage n'a pas été possible en raison de la trop petite quantité de matière disponible.

4° ANALYSE DE LA ROCHE.

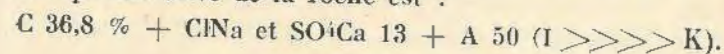
L'échantillon a été livré à l'analyse après un triage à la pince destiné à séparer les morceaux les plus riches en matière argileuse. La prise ainsi étudiée contient 36,8 % de calcite et pas de dolomite ($MgO = 0,16\%$); il n'y a pas d'insolubles mais 13 % de sels solubles dans l'eau, qui sont surtout de l'anhydrite et un peu de sel gemme. Le pH est 7,4.

5° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le spectre de la phase argileuse extraite de cette marne salifère a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont : 9,9.TF avec une ombre à l'intérieur des accolades — 7,2.m — 5,05.AF — 4,27.f — 3,60.f — 3,36.TF. Cet essai montre la coexistence de l'illite sans doute hydratée pour une part et de la Kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est inférieure à 10 % (pl. VI, 6).

6° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire et sursalé. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilocalcaire en milieu sursaturé en sulfate de chaux et en chlorure de sodium. Le pH est 7,4 et la formule représentative de la roche est :



— 41 —

SANNOISIEN
ENSISHEIM (Haut-Rhin)
Marne à anhydrite

Illustration : Analyse chimique tableau 8.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon provient du puits Ensisheim I du Bassin potas-

sique d'Alsace-Lorraine. L'échantillon a été prélevé à la base de la zone salifère supérieure du Sannoisien. Les considérations qui ont été développées pour l'échantillon précédent n° 40 sont valables ici. Il s'agit d'une sédimentation dans un bassin lagunaire sursalé qui n'a probablement aucune communication avec la mer. L'étude minutieuse qui fut faite par QUIEVREUX (323) sur une faune d'insectes fossiles trouvée dans ce gîte salifère, donne des indications sur le climat. Il semble que ce gîte lagunaire sursalé ne soit pas fait sous un climat désertique comme on est tenté de le supposer. Les insectes qui vivaient aux alentours de la lagune forment une population tout à fait tempérée où subsistent seulement quelques éléments de la faune précédente de l'Eocène qui fut tropicale. La Plaine d'Alsace avait, à cette époque, d'après l'anatomie fine des insectes ainsi étudiés, un climat ni désertique ni tropical mais tempéré. Les sels des lagunes étaient sans doute issus du lessivage de formations plus anciennes (Trias-Permien), avec une évacuation difficile et une évaporation normale. Ces considérations montrent que toutes les méthodes peuvent concourir à la reconstitution du passé.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

Les « marnes » d'Ensisheim étudiées ici sont assez dures. Elles sont bien litées et alternent avec des bancs durs et très riches en Anhydrite. Au milieu de ceux-ci, peuvent survenir d'énormes cristallisations de ClNa . Les bancs marneux sont beiges, ont le grain fin et font effervescence à l'acide dilué.

L'examen microscopique a été fait sur une seule plaque mince. Au cours de la taille de celle-ci, faite perpendiculairement à la stratification, seule la partie dure à Anhydrite a subsisté, le reste s'est trouvé entraîné. Dans cette fraction seulement conservée, on voit la texture de l'Anhydrite. Elle apparaît en baguettes enchevêtrées, mimant ce que les pétrographes appellent la texture ophitique. De grosses cristallisations de calcite en jeu de patience se trouvent incluses dans ce fin feutrage aux teintes vives de biréfringence.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche fut triée à la pince de façon à isoler les lits les plus argileux vis-à-vis des lits d'Anhydrite. L'échantillon ainsi préparé contient 6,9 % de calcite et pas de dolomite; 2,04 % de magnésie ont seulement été dosés et les raies de la dolomite ne sont pas visibles aux Rayons X. On peut doser également 24 % de sels solubles malgré le triage préliminaire. Le pH est 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

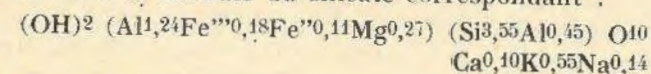
Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilo-calcaire en milieu fortement sursaturé en sulfate de chaux et en chlorure de sodium.

Le spectre de Rayons X a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 10.F avec une ombre entre 14 et 10 entre les accolades — 7,2.ttf — 5,05.f — 4,48.f — 4,27.f — 3,58.ttf — 3,35.TF. Ceci montre que la phase argileuse est constituée d'illite à peu près pure, sans doute hydratée pour une part, et de traces infimes de Kaolinite. On peut admettre ici 100 % de minéraux micacés.

L'analyse chimique dont les résultats sont donnés au tableau

n° 8 montre que le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}} = 3,79$. La proportion de K_2O et MgO est de 6,25 et 2,99 pour 100 grammes de silicate déshydraté.

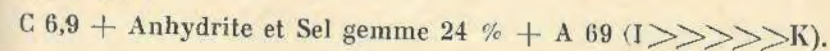
En considérant la phase argileuse comme composée exclusivement de minéraux micacés — ce qui est à peu près réalisé ici — on peut calculer la formule du silicate correspondant :



Cette formule est très comparable à celles qui ont déjà été obtenues pour des phases argileuses exclusivement micacées. On voit un déficit de la somme des ions placés en position octaédrique par rapport au chiffre théorique qui est 2. Par ailleurs, il existe 0,79 ions en position intermédiaire.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilocalcaire sursaturée en sulfate de chaux et chlorure de sodium. Le pH est 7,8. La formule représentative de la roche est :



— 42 —

SANNOISIEN SUPÉRIEUR
FRESNES (Seine-et-Oise)
Marne verte

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans une marnière des environs de Fresnes, au Sud de Paris. L'échantillon appartient aux marnes vertes qui constituent un des niveaux les plus typiques du Sannoisien du Bassin de Paris. Le milieu de genèse est assez énigmatique. En effet, les fossiles sont très rares. LEMOINE (233) cite *Cytherea incrassata* (Desh.), *Cerithium plicatum* (Burg.), *Bithynia pygmaea* (Brongn.) et *B. stampinensis* (C. et L.). J'ignore si ces fossiles ont été trouvés au même point car ils indiquent des milieux fort différents, le premier, marin, le second, saumâtre et le troisième, plutôt lacustre. LEMOINE ajoute que dans beaucoup de localités on trouve dans les marnes vertes des cristaux de gypse. Il décrit sur son graphique le niveau des marnes vertes sous le nom de lagunes marines. A l'opposé GIGNOUX (120) décrit les marnes vertes comme franchement marines. La question n'est donc pas simple et il est probable que le régime a varié au cours de cet épisode. Le faciès restant pourtant dans l'ensemble le même, on peut, avec la prudence nécessaire en pareille matière, se décider pour une lagune d'origine marine et non sursalée. Toutes les variations épisodiques autour de cet état moyen peuvent se produire.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une marne vert pâle friable qui fait boue immédiatement avec l'eau. On ne voit aucune texture et rien n'apparaît dans la masse argileuse à la loupe binoculaire.

Au microscope, l'aspect général est celui d'une marne homogène. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et homogènes. La phase argileuse est masquée par les carbonates, cependant, dans les biseaux de la lame, on peut remarquer qu'elle est presque isotrope et ne montre entre nicols croisés qu'une biréfringence très faible. Les carbonates sont composés de petits rhomboédres de calcite, très réguliers dans leur forme géométrique et leur répartition. Leur taille varie de 5 à 40 μ . La moyenne est d'une dizaine de μ .

Le quartz est relativement abondant. Il a la forme d'éclats anguleux. La taille des grains varie de 30 à 120 μ . La moyenne est vers

60. Ils sont régulièrement disséminés dans la masse. Aucun minéral accessoire n'est visible en dehors de quelques concrétions de limonite. Le lavage n'a rien laissé sur le tamis.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 9,2 % de calcite et pas de dolomite; 4,6 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau; 0,2 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,5.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées sont les suivantes : 9,9.TF avec ombre intense entre les accolades — 7,15.AF — 5.F — 3,60.AF — 3,34.TF. Le résultat de cet essai montre la coexistence, dans le mélange, de l'illite hydratée pour une part, avec de la Kaolinite. La proportion de ce dernier minéral est de 20 % environ. La présence de l'Hydrobiotite n'est pas sûre.

Deux analyses chimiques ont été faites sur des échantillons prélevés autrefois dans une marnière de Fresnes par LAVEZARD (222). Cet auteur signale des nodules de sulfate de strontium au sommet de la coupe. L'analyse chimique de l'argile prélevée à cet

endroit montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}}$ égal à 3,05 et une proportion de

K_2O et MgO , de 6,02 et 2,59 pour 100 grammes de silicate déshydraté. Cette analyse est tout à fait comparable à celle qu'on a obtenue pour les autres roches lagunaires.

A la base de la coupe, LAVEZARD a prélevé un autre échantillon qui indique un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}}$ de 2,92 et une proportion de

K_2O et de MgO , de 2,69 et 5,38. On voit que la proportion de potasse a baissé énormément. Ceci montre que la composition chimique de la phase argileuse dans les marnes de Fresnes varie beaucoup avec les horizons. Les chiffres obtenus pour le niveau supérieur sont proches de ceux qu'on obtient pour les phases argileuses extraites des milieux lagunaires et les nodules de sulfate de strontium semblent caractériser un tel milieu. On ignore s'il s'agit là d'une coïncidence.

5° CONCLUSION.

Le milieu est lagunaire. Les conditions de sédimentation sont variables. Pour l'échantillon choisi, il s'agit d'une boue verte argilo-

calcaire. Le pH est 7,6 et la formule représentative de la roche est :

$$\text{C } 9,2 + \text{I } 4,6 + \text{Fe } 0,2 \text{ (sesq)} + \text{A } 85 \text{ (I } >>> \text{ K)}.$$

— 43 —

STAMPIEN
 SALINELLES (Gard)
 Marne Schisteuse
 Terre à dégraisser

*Illustration : Spectre planche VI, figure 7.
 Microscope électronique, planche III.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Les échantillons de la terre de Salinelles se présentent sous l'aspect d'une marne schisteuse beige. Ils m'ont été communiqués avec obligeance par M. PRAX et J. DE LAPPARENT. Ils proviennent des exploitations qui, aux environs de Salinelles, fournissent la terre à dégraisser. Cette terre est broyée et vendue dans le commerce sous le nom de Terre de Salinelles, Terre de Sommières, Terre du Gard. La stratigraphie des lieux a été décrite par ROMAN (335), et le gisement étudié par H. LONGCHAMBON et MOURGUES (239). Les dépôts sont attribués au Stampien supérieur. La terre à dégraisser se trouve en bancs interstratifiés dans une série calcaire. Ces bancs sont plus épais à la base, vers le milieu et au sommet de la formation; ils forment ainsi trois niveaux possibles à exploiter. Le milieu de genèse est certainement continental, comme toute la série aux environs de Salinelles. On peut préciser de plus que la série est dans son ensemble lacustre. La base de la formation où se trouve la Terre de Salinelles en bancs interstratifiés est abondamment garnie de Limnées qui sont des fossiles lacustres. Au contraire, vers le haut, le calcaire lacustre et la marne schisteuse deviennent pauvres en fossiles mais se chargent de produits bitumineux. Si la Terre de Salinelles est souvent calcaire, ce qui me la fait nommer marne, ce n'est pas toujours le cas dans les bancs les plus purs.

Préciser les conditions de sédimentation à partir de ces données sur le milieu est bien difficile. On sait depuis longtemps par l'utilisation qu'on en fait et par les études antérieures, que cette terre

est composée principalement de magnésite ou sépiolite, déposées en même temps que des carbonates et des silex. On voit d'autre part que la sédimentation est intermittente. On a pu imaginer (239) que les particules de silicates s'accumulant dans le milieu sans se déposer, se précipitaient brusquement sous l'influence d'un changement de celui-ci. Les conceptions actuelles sur la sédimentation réduisent de plus en plus la part des faits qu'on peut attribuer à des accumulations massives de particules en suspension dans les bassins. Ceci est d'autant moins probable que les roches qui séparent deux niveaux à magnésite sont des calcaires. Or, les ions Ca sont très flocculants, et en leur présence aucune substance argileuse n'aurait pu rester en suspension. Il faut ajouter que la sépiolite n'a jamais été décrite dans les produits d'altération des roches et qu'on doit imaginer qu'elle est une néoformation complète dans le bassin lacustre où on la trouve.

Il semble qu'on doit chercher à interpréter les faits de la manière suivante : dans le bassin lacustre le milieu change fréquemment avec des récurrences successives de faciès. Alternent avec les lacs purement calcaires, d'autres lacs où la silice et la magnésie parviennent sous une forme aujourd'hui inconnue. Le milieu provoque la floculation de la silice qui s'organise soit en silex soit en un silicate magnésien par combinaison avec la magnésie. Beaucoup d'auteurs ont songé, pour expliquer ces niveaux silicatés à silex inclus dans les séries calcaires lacustres, à des épisodes saumâtres. C'est d'autant moins impossible que le gypse épigénisé ou non a été trouvé parfois en leur sein. D'autre part des niveaux à magnésite très analogues qu'on trouve dans le Bassin de Paris passent souvent latéralement à des niveaux franchement lagunaires. Ici, à Salinelles, on doit remarquer qu'à quelques kilomètres à l'Est des exploitations, en allant vers le Bassin d'Alès, existent des faciès saumâtres. Il n'y a pas de certitude, mais une possibilité pour que le milieu lacustre calcaire de Salinelles soit passé par des périodes plus saumâtres où une sédimentation silicatée se soit réalisée. En définitive on voit combien les conditions de genèse de la Magnésite de Salinelles sont mal définies. Il est possible qu'elles soient définissables par une étude serrée sur le terrain.

Pour la présente analyse on parlera d'un milieu sûrement continental et intermédiaire entre les conditions du lac calcaire et la lagune hypersiliceuse.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est une sorte de marne beige ou rosée litée très finement. Elle happe à la langue fortement, fait pâte immédiatement

avec l'eau. On remarque sous le binoculaire de la calcite fibreuse dans les fentes, mais il semble y en avoir une part intimement mêlée à la roche, en très petite quantité. Rien d'autre ne peut être vu à l'œil ou à la loupe binoculaire.

Au microscope le premier coup d'œil fait songer aux plus belles sections qu'on puisse obtenir à partir du Kaolin. En effet l'ensemble est cristallisé et polarise dans les gris-blancs du premier ordre. L'examen attentif montre quelques différences. D'abord on remarque quelques grains rhomboédriques de calcite de-ci de-là, ce qui n'arrive jamais dans un Kaolin. Mais la phase argileuse elle-même, parfaitement visible et cristalline, se présente en agrégats de phyllites plus diffus que dans un Kaolin. Les paquets ayant une orientation commune ressemblent plus à de l'ouate tandis que la Kaolinite montre assez bien l'allongement raide de ses phyllites. Une telle coïncidence d'aspect est frappante étant donné la différence des deux minéraux.

On ne remarque que quelques rares grains de quartz (60 μ) et quelques petits minéraux opaques de quelques μ qui sont indéterminables.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche contient 6,1 % de calcite et pas de dolomite, 1,7 % d'insolubles et pas de sels solubles dans l'eau, 0,2 % de fer. Le pH est 7,6.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

L'extraction de la phase argileuse a été faite aux ultrasons. Ceci a permis d'obtenir une fraction fine et abondante dont la taille est inférieure à 0,2 μ .

Les diagrammes de Rayons X ont donné les résultats suivants :

Le spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les lignes mesurées correspondent aux écarts réticulaires suivants (pl. VI, 7) :

11,80.TF — 7,6.f — 6,63.f — 5.f — 4,48.F — 4,27.AF — 3,73.AF — 3,39.AF — 3,18.AF — 2,49.TF — 2,44.m — 2,26.AF — 2,07.m.

La ligne à 4,27 A° correspond sans doute à la raie de base du quartz. On peut comparer aux écarts réticulaires ainsi calculés, les résultats obtenus par MIGEON (287) sur des échantillons provenant également de Salinelles. Les lignes calculées correspondent aux écarts suivants :

11,50 — 4,99 — 4,46.F — 3,78 — 3,41 — 3,21 — 2,62.F — 2,48 — 2,43 — 2,13 — 1,90.F — etc...

Par ailleurs H. LONGCHAMBON (242) a donné pour les sépiolites les écarts suivants à partir d'un échantillon fibreux d'Ampan-dandrava (Madagascar) :

12,15.F — 7,6 — 5,05 — 4,5.F — 3,82.AF — 3,60.AF — 3,40.AF — 3,22 — 2,61 — 2,45 — 2,28 — 2,09.

La concordance entre ces données est satisfaisante.

L'analyse thermique a été étudiée par MIGEON (287) et par LONGCHAMBON (242) et a permis de définir une structure possible pour ce minéral.

L'analyse chimique a donné à MIGEON le résultat suivant :

Quartz 2,71 % — SiO₂ combinée 65,29 % — MgO 29,84 % — Fe₂O₃ 0,60 % — Al₂O₃ 0,96 %.

L'ensemble des données acquises par LONGCHAMBON et ses élèves lui a permis de proposer une structure en chaîne en Si₄O₁₁. La planche III montre une photographie (cliché Mlle MATHIEU-SICAUD, Laboratoire Central des Services Chimiques de l'Etat) obtenue au microscope électronique. Cette photographie montre un aspect fibreux des particules extraites de la Terre de Salinelles, tout à fait semblable à celui des particules d'Attapulgit.

5° CONCLUSION.

Le milieu est continental. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilocalcaire en milieu laguno-lacustre où des silices ont pu se former. Le pH est 7,6. La formule représentative est :

C 6,1 + I 1,7 + A 92 (Sépiolite).

— 44 —

ACTUEL

CHOTT ECH CHERGUI (Algérie)

Dépôt gypseux et argileux

1° GITE ET GÉOGRAPHIE.

Le sédiment étudié ici fut prélevé dans le Chott ech Chergui par M. BENEITO qui m'en a aimablement communiqué un échantillon. Ce chott est le plus grand et le plus élevé des chotts algériens. Il est situé dans le Sud du département d'Oran, entre la chaîne du Tell

au Nord, et l'Atlas saharien au Sud. Cette étendue d'eau est alimentée par le ruissellement saisonnier et par des sources vaclusiennes jaillissant des massifs calcaires qui le bordent; en particulier du massif de Saïda. L'eau de ces sources est relativement douce puisque leur résidu sec n'est que de 1,56 % (GAUTHIER, 117 bis). Le climat dans ces régions est tout à fait remarquable par sa sécheresse et les eaux du chott subissent une évaporation considérable qui les concentrent. Le dépôt est alors formé par une part importante de sels figurés, au premier rang desquels vient le gypse.

2° EXAMEN MICROSCOPIQUE ET ANALYSE DE LA ROCHE.

A l'œil la roche paraît beige clair; elle est rugueuse au toucher et fait d'abord penser à un sable. Dès qu'on l'examine de plus près on voit des efflorescences blanches. A la loupe binoculaire on reconnaît le gypse sous son faciès fibreux. Le lavage de cette terre livre à nouveau du gypse mais en cristaux en forme de navette et présentant les facettes cristallines.

Les sels solubles dans l'eau ont été dosés par lavage à l'eau bouillante. On peut en doser 51 %.

100 gr. de roche ont été mis à bouillir dans 1 litre d'eau. L'analyse quantitative de l'eau donne les résultats suivants en mg. :

Alcalinité (CO_3H) 30,5; Silice (SiO_2) 2,5; Sulfates (SO_3) 1982,0; Chaux (CaO) 1080,0; Chlorures (Cl) 4896,0; Magnésie (MgO) 202; Nitrates (N_2O_5) 0,00; Alcalins (Na_2O) 4,321; Phosphates (P_2O_5) 0,35.

Cet essai montre la part importante des chlorures parmi les sels figurés représentés dans le sédiment. Du gypse est évidemment resté au cours de cet essai dans le résidu sur le filtre.

La détermination des Carbonates montre qu'ils forment 14,5 % de la roche. Ils sont composés principalement de Dolomite.

La proportion d'insoluble est faible, 2,4 %. Les grains de quartz ont 2/10 de millimètre environ; ils ont la forme d'éclats.

3° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les conditions de sédimentation sont manifestes. Milieu lagunaire fortement sursalé et magnésien. Le diagramme de Rayons X a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension à l'ammoniaque. Les équidistances calculées sont :

10,0.F — 7,3.f — 5.f — 4,48.AF — 3,59.f — 3,35.F.

Ces lignes montrent une large dominance de l'illite sur la Kaolinite. Les ombres si habituelles au centre de l'anneau à 10 Å ne

sont pas visibles ici. La proportion de Kaolinite est extrêmement faible, inférieure à 10 %.

1° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est continental et lagunaire. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue très sursalée et magnésienne. Le pH du sédiment est 8,6. La formule représentative de la roche est :

C 9,6 (Dol) 4,9 (Cal) + I 2,4 + Sels figurés 51 + A 31

(I>>>>>K).

CHAPITRE SIXIÈME

ÉTUDE SYSTÉMATIQUE DE ROCHES D'ORIGINE LACUSTRE

Le chapitre sixième sera consacré à l'étude systématique de roches lacustres ou fluviolacustres. Les variations de ces types de sédimentation sont considérables. On passera du complexe fluviolacustre de piedmont, au lac de plaine. On tentera dans chaque cas de reconstituer le milieu de genèse fossile qui ne nous est plus accessible que par quelques caractères et le plan suivi pour l'étude pétrographique sera le même que précédemment (voir page 128).

— 45 et 46 —

WEALDIEN
BAUDOUR (Hainaut - Belgique)
Argilites

Illustration : Spectre planche VI, figure 8.

1° LE WEALDIEN DU HAINAUT.

Les dépôts wealdiens du Hainaut affleurent dans le Bassin de Mons entre le socle schisto-gréseux du Carbonifère et les couches du Crétacé supérieur. Ils ont été étudiés récemment par R. MARRIÈRE (261, 262, 263). Ce savant a démontré que ces couches sédimentaires se terminent en biseau sous le crétacé et correspondent à un grand delta fossile situé dans un chenal N.-S. creusé dans le Paléozoïque. Les couches sont lenticulaires et inclinées vers le Sud. On y trouve des niveaux de couleurs différentes avec des lits sableux

ou ligniteux. Il existe une stratification entrecroisée en grand. Enfin, point notable, l'inclinaison des couches est à la fois supérieure à la pente du socle et au pendage crétacé. Ceci prouve une inclinaison originelle. Une analyse de tous ces points a été faite par R. MARLIERE; les variations de l'inclinaison des couches l'a conduit à reconstituer un delta fluviolacustre (figure 12) où la paléontologie ne révèle que des traces continentales. Cette analyse d'une grande précision éclaire la paléogéographie de la région du Hainaut, mais aussi celle de tout le Wealdien du Nord-Ouest de l'Europe.

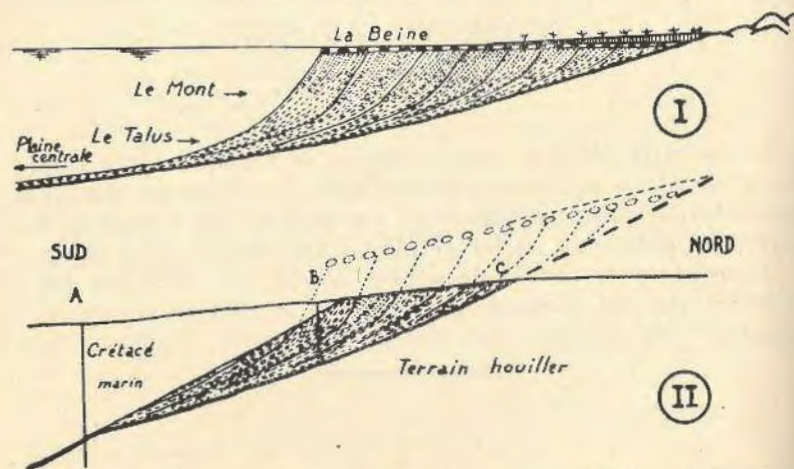


FIGURE 12. — Delta fluviolacustre (d'après R. MARLIERE). — I. Coupe schématique d'un delta fluviolacustre. — II. Reconstitution par R. MARLIERE de la structure géologique du Bassin fluviolacustre wealdien d'Hautrage (Belgique).

« Ainsi que l'écrit ce savant : « Les argiles wealdiennes du Pays de Bray, du Boulonnais, du Weald, de l'Ardenne, du sous-sol parisien et de la Haute-Marne ont appartenu vraisemblablement à un complexe fluviolacustre aux multiples tentacules envoyant ses émissaires vers les mers néoconiennes de l'Yonne. Le Bassin de Mons ne formait qu'un bras de cette immense entité. »

Il est à peine besoin d'insister sur le caractère de grand lessivage qui peut être attribué à de tels dépôts. L'absence de carbonates, les critères paléontologiques et toutes les caractéristiques de la stratification rendent ces formations comparables au Sidérolithique qui, au début de l'ère suivante, couvrira le Sud-Ouest de la France.

2° LES ARGILES DE BAUDOUR.

Les deux échantillons étudiés ici m'ont été communiqués par

M. MARLIERE que je remercie. Il était intéressant pour moi d'étudier des échantillons d'argile née dans un milieu reconstitué avec le plus de précision possible. L'analyse minutieuse de M. MARLIERE donne aux déterminations pétrographiques une base paléogéographique précieuse. Les échantillons ont été prélevés dans la Carrière Blondiau-Dutalis, dans le secteur Ouest de Baudour. La stratigraphie pure de cette carrière montre sous les stériles crétacés plusieurs couches d'argile de diverses couleurs (MARLIERE, 261). L'échantillon n° 45 (qui porte dans la nomenclature de M. MARLIERE le numéro 43) correspond à une couche d'argile grasse et grise de 0,80 m. d'épaisseur qui se trouve à la base de la carrière. L'échantillon n° 46 (qui porte dans la nomenclature de M. MARLIERE le n° 44) a été prélevé dans la partie N.-E. de la carrière et correspond à une terre grise à nodules sidérolithiques visibles sur deux ou trois mètres.

Au sujet de cette exploitation, M. MARLIERE ajoute : « On est frappé de la rapide variation des aspects lithologiques. » Il est évident que les conditions de détail de la sédimentation ont varié énormément. Seul nous apparaît clair le caractère d'ensemble qui correspond à un milieu de grand lessivage dans un delta fluviolacustre, dans des conditions oxydantes qui donnent les concrétions sidérolithiques et des conditions acides qui éliminent les bases.

3° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Terre grise n° 45.* — La roche paraît gris clair avec des passées jaunâtres et blanches. Mouillée, son toucher est gras. On trouve dans sa masse des régions violacées où des sels de fer ont été accumulés.

Au microscope l'aspect général est celui d'une argile très pure parsemée de grains de quartz et de concrétions sphériques de limonite. Aucun plan de stratification n'est visible sur l'échantillon. La texture est homogène. La phase argileuse est très fine mais bien visible au milieu d'une foule d'éléments détritiques de très petite taille. La phyllite cryptocristalline qui paraît essentielle est faiblement biréfringente et orientée en tous sens. Les grains de quartz sont extrêmement nombreux. Ils ont une forme irrégulière. Leur taille varie entre quelques μ et 60 μ . Il semble qu'ils se répartissent en deux lots 10 μ et 45 μ . La roche montre des grains arrondis de limonite de 50 à 100 μ .

B) *Terre grise à nodules sidérolithiques n° 46.* — L'échantillon paraît une terre gris clair à passées roses, violettes, crèmes et blanches.

Au microscope elle paraît voisine de la précédente mais plus

riche en oxyde de fer diffus quoique moins riche en concrétions limoniteuses. Il est vrai que les variations dans la roche sont très nombreuses. La texture est cryptocristalline et on y distingue des trainées plus biréfringentes. Ces dernières sont imprégnées d'oxyde de fer et montrent des phyllites d'une quinzaine de μ de long ayant la biréfringence du mica. L'ensemble de la phase argileuse est au contraire très peu biréfringente. Les quartz sont en forme d'éclats. Leur taille varie de quelques μ à 100 μ de diamètre. Il semble exister deux groupes : celui des très petites tailles qui parsème toute la matière argileuse, et les grains de 50 à 100 μ plus rares et régulièrement répartis. Le lavage a montré une profusion de sphérules sidérolithiques d'un demi-millimètre environ de diamètre. La section mince avait été faite dans un secteur pauvre en ces éléments.

4° ANALYSE DE LA ROCHE.

Les deux roches contiennent respectivement 1,6 % et 1,8 % d'insolubles; 0,7 % et 1,6 % de fer exprimé en sesquioxyde. Les pH sont 4,8 et 5,3.

5° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

L'analyse aux Rayons X de la phase argileuse donne les résultats suivants :

Les spectres ont été faits sur des plaquettes sédimentées à partir de suspensions dispersées à l'ammoniaque. Les écarts calculés pour l'échantillon n° 45 sont :

13,4 floue m — 7,03.TF — 4,9.m. floue — 4,27.tf. — 3,59.TF. — 3,34 fine circulaire (pl. VI, 8).

Il apparaît ici une très large dominance de la Kaolinite et une proportion de 10 % environ de Montmorillonite.

Le deuxième spectre concerne l'échantillon n° 46. Les écarts réticulaires calculés sont les suivants :

14.f et floue — 10.f. — 7,15.TF. — 5.m. et floue — 4,25 circulaire et tf. — 3,59.TF. — 3,35.f. fine et circulaire.

Les résultats de cet essai montrent une très large dominance de la Kaolinite vis-à-vis d'une faible proportion, de 10 % environ, de Montmorillonite probable et d'Illite.

6° CONCLUSION.

Le milieu qui est un complexe fluvio-lacustre de piedmont, est continental. Les conditions de sédimentation correspondent à un dépôt fait dans des eaux courantes (lessivage), eaux qui sont acides

(entraînement des cations) et oxydantes (nodules sidérolithiques). Le pH des roches est 4,8 et 5,3. La formule est :

N° 45 : I 1,6 + Fe 0,7 (sesq) + A 97 (K >>>>> M).

N° 46 : I 1,8 + Fe 1,6 (sesq) + A 97 (K >>>>> M+I).

— 47 —

BARRÉMIEN SUPÉRIEUR SOMMANCOURT (Haute-Marne) Argile marbrée

Illustration : Photo plaque mince, planche I, figure 2.

Analyse chimique, tableau 8.

Analyse thermique, figure 7, courbe III.

Spectre R. X, planche VI, figure 9.

Morphoscopie, figure n° 13.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon n° 47 a été prélevé dans une petite exploitation située aux environs de Sommancourt, commune située à 8 km à l'Est de Wassy, dans la Haute-Marne. En sortant de Sommancourt, par la route de Magneux, on laisse sur sa droite la route d'Avrainville, près du réservoir. En continuant une centaine de mètres, dans la pente, on passe près d'un lavoir. Au-dessus du lavoir, à 3 m. de la route, se trouve cette petite excavation. On y trouve des niveaux sableux grossiers contenant des lentilles d'argiles blanches ou roses et des concrétions de limonite. Se trouvent réunis là, sur quelques mètres d'affleurement, les faciès sidérolithiques qui, en d'autres lieux et à une époque plus tardive, ont donné leur nom à toute une formation.

Cet échantillon appartient au niveau du Barrémien supérieur ou argile marbrée de Cornuel. Ces argiles prennent les teintes les plus variées où pourtant le rose et le violet dominant. On peut encore trouver de ces argiles en travaillant avec une pioche d'abord dans une excavation située au Sud de Louvemont, au Nord du Château du Buisson, près de la maison du garde et aussi dans le bois qui domine à l'Est de Wassy, dans une ancienne exploitation. Cette assise a été autrefois exploitée comme réfractaire par les nombreuses indus-

tries de la région. Cet horizon est considéré comme lacustre ou fluvio-lacustre et précède le dépôt des minerais de fer oolitiques du Barrémien supérieur de Haute-Marne (CORNUEL, 66 bis; CORROY, 71, 72). On n'y a trouvé que quelques débris végétaux, feuilles ou troncs.

Stratigraphiquement, cette argile marbrée de Cornuel se rattache aux sables panachés et argiles bariolées du Cher. Ces dépôts, certainement continentaux, se poursuivent dans l'Yonne. En remontant vers le Nord et dans la Haute-Marne en particulier, seul le Barrémien supérieur conserve ce faciès car le Barrémien inférieur est représenté par les argiles ostréennes marines. Encore plus au Nord, dans le pays de Bray, le Boulonnais et l'Angleterre, cette formation continentale comprend le Valanginien, l'Hauterivien et le Barrémien. Elle est tellement caractéristique qu'on lui a donné un nom spécial, celui de Wealdien. L'argile marbrée de Cornuel, avec le fer sidérolithique qui la surmonte, est donc la prolongation du faciès Wealdien en Haute-Marne, mais beaucoup moins épais et ne représentant plus dans la succession des temps que la partie supérieure du Barrémien.

Les conditions de sédimentation sont les mêmes que celles du Wealdien : eaux acides de lessivage des continents surélevés, entraînant des sables et des argiles avec des débris végétaux.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'échantillon étudié se trouve en lentilles de couleur crème ou rose dans une formation sableuse. L'aspect est homogène et cette terre plongée dans l'eau devient grasse.

Au microscope, les textures normale et parallèle à la stratification paraissent identiques. La phase argileuse est parfaitement visible. Elle est cryptocristalline, avec des dispositions en traînées biréfringentes, orientées en tous sens. Cet aspect est représenté planche I, figure 2.

Les quartz sont très rares dans l'échantillon taillé, bien que la terre soit incluse dans une formation sableuse. Leur forme est celle d'éclats. Leur taille est de 5 à 20 μ , avec la majorité vers 10 μ . Ils sont régulièrement dispersés. Le seul minéral accessoire visible est de la limonite diffuse avec quelques agrégats jaunes, tantôt en masses dans la roche, tantôt en alignements. Le lavage a seulement livré quelques grains de quartz.

3° ÉTUDE DU SABLE ENCAISSANT.

La courbe morphoscopique de CAILLEUX (58 bis) a été faite

sur le sable au milieu duquel la lentille argileuse est incluse (fig. 13). Cette courbe montre que le pourcentage de grains émoussés luisants à la taille de 0,3 mm., est inférieur à 20 %. Ce sable, sauf erreur d'interprétation, se classe donc parmi les formations fluviolacustres.

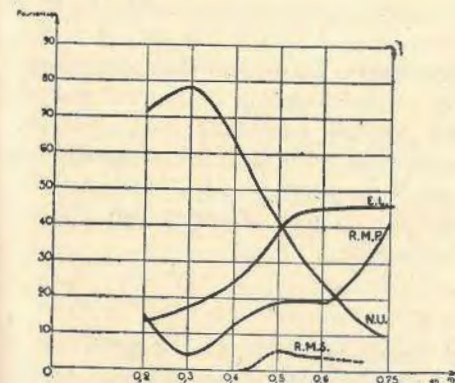


FIGURE 13. — Diagramme morphoscopique du sable de Sommacourt, Barrémien sup. (H.-Marne) n° 47. EL : grains émoussés luisants. R.M.P. : ronds mats propres. NU : non usés. R.M.S. : ronds mats sales.

4° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche ne contient ni calcaire, ni dolomite, ni sels solubles dans l'eau; on y trouve 2,6 % d'insolubles et 1,26 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 4,5.

5° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

La phase argileuse extraite de cette roche sédimentaire a donné les diagrammes de Rayons X suivants. Ces spectres ont été faits sur des plaquettes sédimentées à partir de suspensions dispersées à l'ammoniaque mais avec des montages différents et sur des produits de finesse différente. Les résultats sont très voisins.

Pour le premier spectre, les lignes mesurées sont : ombres entre 14 et 10 — 10.m — 7,1.TF — 5.f — 3,58.F — 3,33.f. (pl. VI, 9).

Pour le deuxième spectre : ombres entre 14 et 10 soulignées à 14 et 12 — 10.m — 7,15.TF — 5.m — 3,60.TF — 3,35.m.

Pour le troisième spectre : ombres très foncées au centre — 10.AF — 7,03.TTF — 5.AF — 3,60.TF — 3,35.AF.

La conclusion de ces essais est que l'Argilite de Sommacourt contient de la Kaolinite largement dominante d'une part, de l'Illite et de l'Hydrobiotite d'autre part. Les minéraux micacés correspondent à 20 % du mélange.

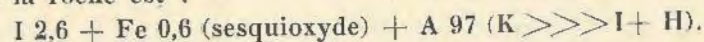
L'analyse thermique a été faite et est analysée page 110. La courbe est représentée fig. 7, courbe III. Elle montre un crochet à

550°, caractéristique de la Kaolinite; de plus, un début d'inflexion à 480° qui confirme la présence de l'illite.

L'analyse chimique dont les résultats sont donnés au tableau 8, montre un rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq}}$ de 2,5, beaucoup plus près de 2 que dans les roches des deux chapitres précédents. La proportion de potasse et de magnésie est de 4 et de 0,33. On voit que la teneur en potasse est encore grande; il est possible qu'une partie en soit adsorbée. Quelle que soit la cause, cette proportion explique les propriétés de « moyen réfractaire », qui sont attribuées aux argiles barrémiennes de la Haute-Marne. Ceci est une raison de leur abandon qui s'ajoute au fait que leurs gîtes sont lenticulaires.

6° CONCLUSION.

Le milieu est continental et fluvio-lacustre. Les conditions de sédimentation sont celles qui règnent dans des eaux acides, oxydées et de grand lessivage. Le pH est 4,5. La formule caractéristique de la roche est :



— 48 et 49 —

WEALDIEN
PAYS DE BRAY
Argilites

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

C'est aux environs de Gournay-en-Bray que les échantillons n° 48 et 49 ont été prélevés dans une exploitation qui se trouve au lieu dit Mercastel. Cette exploitation est faite dans la base de l'épaisse formation qu'on peut assimiler au Wealdien. Cette formation, dans le Pays de Bray, peut se diviser de la manière suivante :

A) Au sommet, on trouve l'argile panachée qui est considérée comme l'équivalent de l'argile marbrée de Haute-Marne (CORNUEL, 66 bis; A. DE LAPPARENT, 202);

B) Au-dessous, se trouvent les grès ferrugineux alternant avec des argiles noirâtres contenant des débris végétaux et des concrétions

sidérolithiques. En divers endroits, la trace d'incursions marines a pu être démontrée dans cette formation lacustre dans son ensemble. Il s'agirait des dernières influences de la mer à spatangues de l'Hauterivien;

C) A la base, se trouvent les sables blancs et argiles réfractaires de A. DE LAPPARENT, qui seraient à peu près l'équivalent du Valanginien. C'est dans ce niveau inférieur que les deux échantillons 48 et 49 ont été prélevés.

La succession dans ce niveau est très nette dans cette région. A la base se trouvent des argiles compactes gris clair; au-dessus, une épaisse couche de sables d'une vingtaine de mètres. Au-dessus des argilites schisteuses grises à reflet rosé. L'ensemble de la formation est continental et contient des restes végétaux (A. CARPENTIER, 59). Les conditions de genèse d'une pareille formation sont identiques à celles qui ont déjà été décrites à propos du Wealdien du Hainaut. Il s'agit ici de dépôts fluvio-lacustres ravinant d'ailleurs le sous-sol jurassique. Les eaux étaient courantes, agressives et riches en oxygène, ainsi qu'en témoigne l'abondance des concrétions ferrugineuses.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est grise et uniforme. On ne remarque aucune texture particulière.

L'examen microscopique montre une texture extrêmement homogène où la phase argileuse est à peu près seule. Elle apparaît cryptocristalline en innombrables paillettes faiblement biréfringentes. Les contours sont mal limités et de temps à autre des alignements préférentiels dans la pâte dessinent des traînées plus biréfringentes.

Les grains de quartz sont très rares; leur taille varie de 5 à 10 μ .

3° ANALYSE DES ROCHES.

L'analyse chimique n'indique ni calcite, ni dolomite, ni sels solubles dans l'eau; on trouve des traces de quartz non dosables et 0,9 %, 0,64 % de fer. Les pH des deux roches sont 4,4 et 3,7.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Deux diagrammes de Rayons X ont été faits sur des plaquettes sédimentées à partir de suspensions dispersées à l'ammoniaque.

Le premier spectre concerne le n° 48, de Mercastel. Les distances réticulaires calculées sont : 11,8.f avec ombres entre les accolades — 7,03.TF — 3,57.TF.

Le deuxième spectre concerne le n° 49, de MERCASTEL, et donne les résultats suivants : 10.tf — 7,15.TF. — 5.tf et floue — 4,27.tf — 3,59.TF.

Le résultat de ces essais montre une très large dominance de la Kaolinite, avec une trace infime de minéraux micacés qui semblent être la Montmorillonite dans un cas, et l'Illite dans l'autre. Ces minéraux sont en proportion tellement faible qu'ils se manifestent à peine par la raie à 5 A° et que la raie à 3,34 A° qui leur est si familière n'est pas visible. On doit noter leur présence, sans d'ailleurs pouvoir préciser à quel type ils appartiennent, mais on peut dire que la Kaolinite forme certainement plus de 90 % du mélange dans ces roches.

5° CONCLUSION.

Le milieu est continental et fluvio-lacustre. Les conditions de sédimentation sont celles qui règnent dans les eaux courantes, agressives et oxydantes. Le pH des roches est de 4,4 et 3,7. Les formules sont :

Ech. n° 48 : I traces + Fe 0,9 (sesq) + A 98 (K >>>>>> M).

Ech. n° 49 : I traces + Fe 0,64 (sesq) + A 98 (K >>>>>> I).

— 50 et 51 —

SIDÉROLITHIQUE

DOUZILLAC (Dordogne) et MONTGUYON (Charente-Maritime)
Argilites blanches

*Illustration : Spectre planche VII, figure 1 (Douzillac).
Spectre planche VII, figure 2 (Montguyon).*

1° LE SIDÉROLITHIQUE DU SUD-OUEST DE LA FRANCE.

Dans le Sud-Ouest de la France, reposent d'une manière générale sur les terrains crétacés, des dépôts auxquels on a donné le nom de Sidérolithique et qui correspondent à une sédimentation continentale irrégulière à l'Eocène. Ces dépôts ont été étudiés récemment par SCHOELLER; ils sont formés de sables quartzeux grossiers, jaunâtres, blancs ou lie-de-vin où peuvent se trouver des lentilles argileuses blanches, grises ou marbrées de rose. Les argiles se trou-

vent surtout à la base de la formation. De nombreux gisements de limonite y sont connus depuis longtemps.

La mise en place peut être reconstituée de la manière suivante. Après le Crétacé, un relief accentué s'est créé dans le Massif Central et les auréoles jurassiques et crétacées qui l'entourent. Une avalanche de produits détritiques descendit alors du Massif Central, comblant les vallées et toutes les dépressions éocènes. L'ensemble constitue ce qu'on appelle une formation alluviale de piedmont. SCHOELLER a montré que les eaux qui avaient entraîné ces produits puis les avaient même traversés étaient des eaux acides, capables de détruire les silicates et de faire migrer l'oxyde de fer. La présence de la limonite en montre le caractère oxydant. Oxygène et gaz carbonique concourent à faire de ces eaux des eaux agressives qui, rapidement courantes, sont capables d'une profonde action sur les matériaux qu'elles transportent et d'un lessivage total des bases originaires du massif silicaté. Au gré des courants, se sont déposés soit des sables, soit des lentilles argileuses où les percolations, qui se poursuivaient, précipitaient la limonite. Plus tard, ainsi que l'a montré VATAN, le Bassin d'Aquitaine reçut les mollasses détritiques des Pyrénées. Mais leurs conditions de sédimentation que SCHOELLER a mises en évidence sont fort différentes : le calcaire intervient dans des lacs, le pH remonte et on ne trouve plus ni argiles réfractaires, ni limonite dans ces mollasses (Bibliographie : LAVILLE, 223; LAVEZARD, 222; SCHOELLER, 346, 347; BERGOUNOUX, 20; VATAN et KRAUT, 378; VATAN, 380).

2° ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS.

Les deux échantillons étudiés répondent à de telles conditions de formation. L'un, offert par M. DE SAINT-OURS, provient d'une poche des environs de Douzillac (Dordogne); l'autre provient de Montguyon (Charente-Maritime).

Leur aspect macroscopique est semblable à celui d'un Kaolin très blanc mais avec un toucher plus gras.

Au microscope, les deux sections minces sont analogues. Aucun sens de stratification n'est possible à déterminer sur l'échantillon. La texture est homogène. La phase argileuse est cristalline. Le champ est entièrement parsemé de phyllites groupés en paquets qui sont eux-mêmes enchevêtrés. L'ensemble polarise dans les blancs et tous les paquets phylliteux s'éteignent avec l'extinction droite. Quelques grains de quartz sont visibles; l'un d'eux a 65 μ , les autres en ont 30. Ils sont fort rares. Dans l'ensemble, le développement des phyllites serait plus grand dans l'échantillon de Montguyon que dans celui de Douzillac.

Le lavage n'a rien laissé sur le tamis.

3° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

L'analyse de la roche n'a révélé comme éléments étrangers à la phase argileuse que des traces de quartz : 1,4 % pour Douzillac et 1,8 % pour Montguyon. La phase argileuse a donné aux Rayons X les résultats suivants :

Les spectres ont été faits sur des plaquettes sédimentées à partir de suspensions dispersées à l'ammoniaque. Les distances réticulaires qu'on a pu calculer sur le premier spectre, qui concerne Douzillac, sont : ombres entre 14 et 12 — 10.f — 7,03.TF — 5.f — 3,57.TF — 3,34.tf. Cet essai indique que la Kaolinite est largement dominante avec une faible proportion d'Illite et peut-être un peu d'Hydrobiotite ou de Montmorillonite mais ces éléments sont tellement accessoires qu'on peut dire que la Kaolinite a une teneur voisine de 100 % dans le mélange (pl. VII, 1).

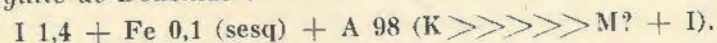
Les écarts réticulaires qu'on peut calculer sur le deuxième spectre (Montguyon, n° 51), sont presque identiques : ombres entre 14 et 12 — 10.f — 7,03.TF — 5.f — 3,57.TF — 3,34.tf et la conclusion est la même (pl. VII, 2).

Ils montrent en somme que dans les deux roches la proportion de Kaolinite est à peine inférieure à 100 %, les impuretés étant des traces de Montmorillonite douteuse et l'Illite. Il est à remarquer que sur les Kaolins typiques comme celui de St-Austell (Cornouailles), les mêmes impuretés se révèlent. Il n'existe peut-être pas de Kaolinite rigoureusement pure.

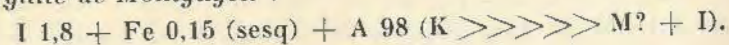
4° CONCLUSION.

Le milieu est continental et fluvio-lacustre. Les conditions de sédimentation sont celles d'eaux courantes, acides et oxydantes. Le pH est 4,7 et 4,2. Les formules représentatives de ces roches sont :

Argilite de Douzillac :



Argilite de Montguyon :



— 52 et 53 —

SPARNACIEN
LES PLEUX et LES COURTILS
BASSIN DE PROVINS (Seine-et-Marne)
Argilites

*Illustration : Analyse thermique, figure 7, courbe II (Provins).
Spectre planche VII, figure 3.*

1° LE BASSIN DE PROVINS.

Au début du Landénien, une transgression marine s'est produite, donnant dans le Bassin de Paris les sables de Bracheux bordés au Sud-Est par des faciès de calcaires lacustres comme le travertin de Sézanne (Thanétien). Au Landénien supérieur, la régression se produit et le faciès devient lagunaire dans le Soissonnais. Les dépôts sont lacustres dans la région de Provins mais ils sont argileux : il s'agit de l'étage de l'Argile plastique des anciens auteurs. La sédimentation est extrêmement irrégulière. Dans la région de Provins (THOMAS, 363), la base est formée tantôt par des graviers ferrugineux, tantôt par des bancs argileux colorés, tantôt par des sables grossiers. On trouve des lentilles de lignite et parfois l'argile devient impure et se charge de pyrite. Vers le Sud, la proportion des détritiques augmente; on passe aux nombreux faciès décrits dans le Sénonais, le Gâtinais et les coupes de La Puisaye par LANQUINE et CUVILLIER (199), puis aux arkoses de Breuillet (L. BERTRAND) où se trouvent encore des lentilles réfractaires (échantillon cité dans le tableau n° 11) et enfin aux Poudingues de Nemours. Ainsi l'on voit, du Sud au Nord, la disposition paléogéographique se préciser : Alluvions de piedmont détritiques, au pied du Massif Central; grands lacs plus ou moins troublés par les incursions torrentielles dans le bassin de Provins; lagunes saumâtres plus au loin, dans le Soissonnais, quand le niveau de base de l'érosion fluviale est atteint. C'est au faciès médian que l'on s'est adressé ici par deux argiles du bassin de Provins. La variabilité des conditions de sédimentation est extrême mais on y reconnaît le caractère lacustre. On doit même signaler la présence des acides humiques qui foncent la couleur de beaucoup de ces argiles. Ici, le caractère acide du milieu subsiste, comme en témoignent à la fois des acides humiques et l'absence de toute concrétion ou de toute coquille calcaire; par contre le caractère du lessivage est peut-être estompé.

2° LES ÉCHANTILLONS ÉTUDIÉS.

L'échantillon n° 52 provient de la Collection A. LANQUINE, qui l'a mis obligeamment à ma disposition. Il a été prélevé dans la carrière des Pleux, commune de Hermé, dans l'arrondissement de Provins. L'échantillon n° 53 provient de la carrière des Courtils, près de Provins. Ces deux échantillons, très semblables au milieu de la variété des Terres de Provins, ont été étudiés ensemble.

Les deux roches sont des terres plastiques grises faisant une boue très plastique avec l'eau. Aucun plan de sédimentation ne peut être décelé sur les échantillons.

Au microscope, la texture est homogène. La phase argileuse est parfaitement visible; on peut la qualifier de cristalline dans son ensemble mais le degré de cristallinité des phyllites est moins poussé que dans les échantillons du Sidérolithique. De plus, une sorte de teinte ocre est visible à la lumière naturelle et jaunit les teintes de biréfringence en lumière polarisée. Des traînées plus biréfringentes sont visibles comme à l'habitude : quelques grains de quartz sont répartis dans la roche. Leur forme est celle d'éclats anguleux. La taille est comprise entre quelques μ et 80 μ ; ils sont rares et la taille la plus fréquente est de 5 à 10 μ . Le seul minéral accessoire visible est de la limonite en traînée.

3° ANALYSE DES ROCHES.

L'analyse de ces roches n'a révélé ni calcite, ni dolomite, ni sels solubles dans l'eau. On peut doser par contre 2,6 % d'insolubles dans Les Pleux et 2,1 % d'insolubles dans Les Courtils; 0,9 % et 1,35 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH des deux roches est 5,9 et 3,9.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

L'analyse de la phase argileuse a donné aux Rayons X les renseignements suivants. Les spectres ont été faits sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque.

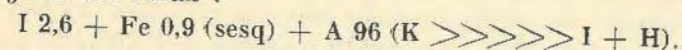
Le premier spectre concerne l'argilite des Pleux (n° 52). Les distances réticulaires calculées sont les suivantes : 12.f et floue — 10.f et floue — 7,03.TTF — 5.ttf et floue — 3,57.TTF — 3,34.ttf — 2,39.AF. On peut conclure de cet essai que la Kaolinite est largement dominante, avec des traces de micas hydratés. Le mélange peut être considéré comme formé de Kaolinite dans une proportion à peine inférieure à 100 % et certainement supérieure à 90 %, comme l'indiquent surtout les rapports d'intensité entre les raies à 3,57 Å et 3,34 Å.

Le deuxième spectre concerne Les Courtils (n° 53) et montre des lignes fort analogues : ombres intérieures à 12 — 10.ttf — 7,03.TF — 5.ttf — 4,29.f et circulaire — 3,57.TF — 3,34.AF et circulaire. On peut conclure de cet essai, à un mélange de Kaolinite et de micas hydratés, où la proportion du premier minéral est à peine inférieure à 100 % (pl. VII, 3).

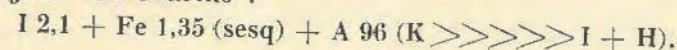
5° CONCLUSION.

Le milieu est continental et lacustre. Les conditions de sédimentation correspondent à des eaux acides débarrassées de cations. Les pH sont de 5,9 et 3,9. Les formules représentatives de ces roches sont :

Argilite des Pleux :



Argilite des Courtils :



— 54 —

CHATTIEN AQUITANIEN
WESTERWALD
Argile grésante

*Illustration : Analyse thermique, figure 7, courbe IV.
Spectre planche VII, figure 3.*

1° GÉNÉRALITÉS.

Dans le Westerwald, en Allemagne, à l'Oligocène supérieur, un régime continental s'est établi. Au milieu de formations sableuses, des lentilles argileuses sont activement exploitées comme terre réfractaire ou terres grésantes. L'échantillon n° 54 appartient à la Collection A. LANQUINE, qui a bien voulu le mettre à notre disposition. C'est une argile grésante. On peut considérer les conditions de formation de ces niveaux comme très analogues à celles du Bassin de Provins.

2° ANALYSE DE LA ROCHE.

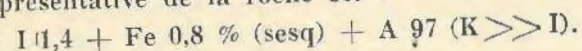
La roche est une argilite qui se présente comme un Kaolin sédimentaire blanc à peine teinté de crème. La proportion d'insolubles, qui est de 1,4 %, est très faible; celle du fer aussi : elle est de 0,8 %, exprimée en sesquioxyde. Le pH est de 5,8.

3° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le diagramme de Rayons X a été fait sur une plaquette désimmentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les écarts réticulaires calculés sont : 9,82.AF avec ombres à l'intérieur — 7,03.TF — 5,05.m — 4,48.f — 3,57.F — 3,34.AF. Le résultat montre un mélange d'Illite et de Kaolinite où ce dernier minéral domine nettement. La proportion de minéraux micacés, évaluée tant sur l'intensité des lignes de bases que sur celles qui mesurent 3,58 et 3,34 Å, est de 30 % au grand maximum (pl. VII, 4).

4° CONCLUSION.

Le milieu est continental et lacustre. Le pH est 5,8. La formule représentative de la roche est :



— 56 —

LUTÉTIEN SUPÉRIEUR
HERBÉVILLE (Seine-et-Oise)
Marne feuilletée

Illustration : Planche VII, figure 5.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon fait partie de la collection de M. G. LUCAS, qui a bien voulu me le communiquer. Il a été prélevé dans la vallée de la Mauldre, au bord de la route qui joint Maule à Herbéville, à une vingtaine de kilomètres à l'Ouest de Versailles. Cette roche se trouve interstratifiée entre une caillasse siliceuse à la base et un calcaire lacustre au sommet. Ces deux roches encaissantes contiennent toutes deux *Cyclostoma mumia* et *Potamides lapidum*. La couche

marneuse a deux à quatre centimètres d'épaisseur. La série est incontestablement lacustre. Les influences lagunaires ne sont d'ailleurs pas impossibles car MUNIER-CHALMAS (295) décrit à peu de distance de là, à l'intersection du chemin de fer Paris-Dreux et du canal de l'Avre, un Lutétien supérieur à *Potamides Lapidum* formé de calcaires et marnes blanches avec intercalation de quatre ou cinq bancs de gypse épigénisé par de la calcite et de la silice. Le mince niveau argileux décrit ici correspond-il à une influence lagunaire ? c'est une question que la description pétrographique suivante permet de se poser. On n'a aucun moyen d'y répondre pour l'instant.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche se présente à la manière d'un schiste extrêmement tendre, se rapprochant de l'aspect de certain « carton des montagnes ». La roche ne fait pas effervescence.

Au microscope, on observe un aspect semblable à la fois à celui de la Sériolite de Salinelles et à celui d'un « Kaolin sédimentaire ». La section normale à la stratification n'a pas été possible à faire. La section parallèle montre une texture homogène. La phase argileuse est parfaitement visible. Les phyllites groupées en paquets à extinction droite communes, sont disposées en tous sens. La teinte de polarisation est dans les blancs du premier ordre; une teinte ocre visible en lumière naturelle vient jaunir l'aspect entre nicols croisés.

Des quartz en forme d'éclats sont visibles de-ci, de-là. Ils sont rares et bien calibrés; leur taille est comprise entre 50 et 75 μ . Aucun minéral accessoire n'est visible, mais il existe une imprégnation générale ferrugineuse. Le lavage n'a pas été possible.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

La roche ne contient pas de calcaire, ni de dolomite, ni de sels solubles dans l'eau. Elle contient par contre 2,8 % d'insolubles, 0,54 % de fer exprimé en sesquioxyde. Le pH est 8,1.

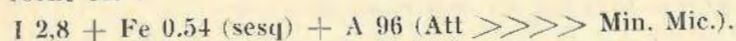
1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le diagramme de Rayons X a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les écarts calculés sur les lignes du spectre sont : accolade à 12.F à l'intérieur de l'anneau — anneau à 10,25 — 6,44.AF — 5,42.m — 5 (accolade étroite).f — 4,48.AF — 3,70.m — 3,23.TF — 2,62.F et floue — 2,13.m et floue. On voit ici les lignes caractéristiques de l'Attapulgit. Il faut y ajouter une faible proportion d'un minéral

micacé dont l'espace basal donne des accolades à 12 A° et les petites accolades à 5 A°. On peut donc conclure de cet essai que la phase argileuse est composée d'Attapulgitite avec une faible proportion d'un minéral micacé encore indéterminé (pl. VII, 5).

5° CONCLUSION.

Le milieu est continental et lacustre. Les conditions de sédimentation sont liées au dépôt d'une série lacustre calcaire, avec un intermède argileux pouvant coïncider avec une influence lagunaire qui n'est pas certaine. Le pH est 8,1. La formule représentative de la roche est :



— 57 —

SANNOISIEN SUPÉRIEUR
CORMEILLES-EN-PARISIS (Seine-et-Oise)
Calcaire argileux à Limnées

Illustration : Planche VII, figure 6.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Cet échantillon provient de la grande carrière de Cormeilles-en-Parisis qui a déjà été située page 205. Il appartient à la collection de M. G. LUCAS qui me l'a obligeamment procuré. Il a été prélevé sous les marnes à huîtres et correspond à un niveau du Calcaire lacustre de Brie. Ce faciès lacustre est confirmé par le grand nombre de Limnées qui pétrissent la roche. Très calcaire, celle-ci peut être considérée comme le type de roche à la fois calcaire et lacustre dans cette étude.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche est dure et présente un peu l'aspect de la craie, en marquant facilement comme elle. Légèrement teintée de gris-vert, elle contient un grand nombre de Limnées.

Au microscope, cette roche apparaît comme un calcaire très fin. De petits cristaux de calcite de 2 à 3 μ forment la pâte au milieu

de laquelle on distingue : a) des amas cristallisés de calcite aux éléments un peu plus gros (20 à 30 μ), et b) des traces organiques en forme d'accolade et autres débris de fossiles.

La phase argileuse n'est pas visible car elle est entièrement masquée par le carbonate. On aperçoit de-ci, de-là, quelques menus éclats de quartz très rares, mesurant 5 à 30 μ . La majorité est de 10 μ . On ne remarque aucun minéral accessoire, si ce n'est une légère imprégnation générale ocre.

Le lavage n'a pas été possible car la roche ne se délite pas naturellement dans l'eau.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

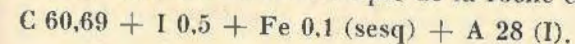
La roche contient 60,69 % de calcite et pas de dolomite (Mgo = 1,04 %), ni de sels solubles dans l'eau. Le pourcentage d'insolubles est très faible (0,5 %) et celui du fer, exprimé en sesquioxyde, est de 0,1 %. Le pH est 8,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Le diagramme de Rayons X a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les distances réticulaires calculées sont les suivantes : 9,9 avec une ombre à l'intérieur des accolades — 5,05.m — 3,34.F. On remarque une légère ombre vers 7 A° mais ceci doit correspondre au maximum à des traces de Kaolinite. On peut conclure à la présence de tout près de 100 % d'Illite (pl. VII, 6).

5° CONCLUSION.

Le milieu est lacustre et calcaire. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argileuse très riche en calcite. Le pH est 8,8. La formule caractéristique de la roche est :



— 58 et 59 —

STAMPIEN SUPÉRIEUR
GERGOVIE (Puy-de-Dôme)
Calcaire argileux et Marne verte

Illustration : Spectre planche VII, figure 7.
Graphique figure 2.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

Ces deux échantillons ont été prélevés dans une carrière située au flanc du plateau de Gergovie, où MM. ROQUES et MICHEL, de Clermont-Ferrand, ont bien voulu me guider. Cette carrière est située à l'extrémité méridionale du versant Est du plateau. Elle est exploitée pour fournir la pierre à chaux. On y voit sur un front de taille de trente mètres de haut, une alternance de bancs épais de calcaires argileux blancs et de marnes vertes avant un délit de shales. D'après la mise au point récente de MICHEL (286 bis), on peut dater ces niveaux, par la flore et par la faune très riche en vertébrés, du Stampien supérieur, un peu avant la fin de cette époque. Le milieu de genèse est continental et lacustre, ainsi que le prouvent les invertébrés trouvés : Cypris, Helix, Limnées, Planorbes, et la présence de nids de Tortues fossiles. Certains niveaux deviennent hypersiliceux au point de donner des cordons de silex ou même des couches siliceuses interstratifiées dans la formation calcaire.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

A) *Calcaire argileux blanc*. — Cette roche a l'aspect d'un calcaire blanc gris crème massif mais il est tendre et marque l'ardoise comme la craie.

Au microscope, l'aspect général est celui d'un calcaire. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques et homogènes. Dans les biseaux de la préparation, le calcaire apparaît comme formé d'une infinité de petits grains de calcite dont beaucoup sont rhomboédriques et qui mesurent 5 μ de diamètre. La phase argileuse est complètement masquée.

Quelques grains de quartz sont isolés dans la roche, de 20 μ environ. L'un d'eux, exceptionnellement, mesure 45 μ . On ne voit aucune trace organique dans la section étudiée, aucun minéral accessoire n'est définissable. En lumière naturelle, la roche paraît au

microscope gris beige; ceci ne semble pas dû à une imprégnation limoniteuse mais à la présence des minéraux argileux. Le lavage n'a pas été possible car la roche ne se délite pas dans l'eau.

B) *Marne verte*. — La roche est feuilletée et l'on peut lui donner le nom de shales. Elle est verte, surtout quand la roche est humide. L'effervescence est vigoureuse à l'acide dilué mais certains niveaux restent presque inertes. Ces passées vertes sont donc inégalement carbonatées.

Au microscope, on voit que la calcite est encore assez abondante pour masquer presque complètement la phase argileuse. La texture normale à la stratification est régulièrement litée. La texture parallèle à la stratification est homogène et constituée uniformément d'une accumulation de grains de calcite de quelques μ . La phase argileuse apparaît à peine dans les biseaux des préparations et est presque isotrope.

Quelques grains de quartz sont visibles mais ils sont très rares. Leur taille la plus commune est 15 μ , quelques-uns atteignent 40 μ . Aucun minéral accessoire n'est à signaler, sauf quelques concrétions de limonite.

Rien n'est resté sur le filtre après le lavage.

3° ANALYSE DES ROCHES.

A) *Le calcaire argileux* contient 84,25 % de calcaire et pas de dolomite. La proportion de MgO, égale à 1,08 %, est très faible vis-à-vis de cette forte teneur en CO_3Ca et les raies de la dolomite n'apparaissent pas dans le spectre. Les insolubles sont à l'état de trace (0,6 %) et le fer, calculé en sesquioxyde, est peu abondant (0,24 %). Le pH est 8,1.

B) *La marne verte* analysée contient 12,49 % de calcite. Certains échantillons en sont plus riches, d'autres, plus pauvres. Il n'y a pas de dolomite ni de sels solubles. Par contre, on peut doser 1,2 % d'insolubles et 1 % de fer, exprimé en sesquioxyde. Le pH est 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Après l'attaque convenable de la roche et la séparation de la phase argileuse, celle-ci apparaît vivement colorée en brun pour le calcaire et en vert pomme pour la marne verte. Quatre diagrammes de Rayons X ont été faits. Les deux premiers concernent le calcaire, les deux seconds concernent la marne verte.

Le premier spectre a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les écarts réti-

culaires calculés donnent des raies nettes à 10.TF — 5.TF et 3,34.TF. Ces données indiquent l'Illite pure.

Le deuxième spectre a été fait sur une poudre traitée à l'acétate de sodium, au chlorure de calcium et séchée au benzène. Les distances réticulaires mesurées sont : 9,9.F — 4,48.TF — 3,34.AF. La phase argileuse est donc constituée exclusivement d'Illite.

Le troisième spectre, concernant la marne verte, a été fait sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Le résultat en est le suivant : 10.TF — 5,05.AF — 3,35.TF. L'ombre intérieure aux accolades à 10 A° est extrêmement légère. On peut considérer que la phase argileuse contient 100 % d'Illite. Pour le vérifier un quatrième spectre a été fait sur une poudre traitée à l'acétate de sodium, au chlorure de calcium et séchée au benzène. Les lignes obtenues sont les suivantes : 10.TF — 4,48.TF — 3,34.AF. Aucune raie à 14 A° n'est apparue. On peut donc conclure à la présence unique de l'Illite dans la phase argileuse extraite de cette roche (pl. VII, 7).

5° CONCLUSION.

Le milieu est continental et lacustre. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue argilo-calcaire. Le pH est 8,1 et 7,8. Les formules représentatives de ces deux roches sont :
Calcaire argileux : C 84,25 + I 0,6 + Fer 0,24 (sesq) + A 14 (I).
Marne verte : C 12,5 + I 1,2 + Fer 1 (sesq) + A 85 (I).

— 60 —

AQUITANIEN
 DONNERY (Loiret)
 Argilite calcaire

Illustration : Spectre planche VII, figure 8.

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon appartient à la Collection de M. BOURCART, qui a bien voulu me le communiquer. Cette Argilite très peu calcaire provient de Donnery, près de Fay-aux-Loges, dans le Loiret, à moins de 2 km à l'Est d'Orléans. La stratigraphie et la pétrographie de

ces assises résultent des travaux de DENIZOT et BOURCART (89, 89 bis, 31 bis, 32 bis). Le calcaire exploité en carrière à Donnery appartient à l'Assise de Pithiviers, qui est la partie supérieure du Calcaire de Beauce dont on fait volontiers de l'Aquitaniien. Ce calcaire contient, à Donnery, des Linnées et des Planorbes qui caractérisent un milieu lacustre calcaire.

Interstratifiés dans cette série, se trouvent des niveaux argileux dont l'un est étudié ici.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

La roche se présente comme une Argilite grumelleuse sans stratification visible sur l'échantillon. L'effervescence ne se produit que par places et assez rarement. La couleur est gris à gris-verdâtre.

Au microscope, la texture apparaît homogène. La phase argileuse est parfaitement visible et cristalline. Les phyllites groupées en agrégats à extinction commune sont enchevêtrées. Il existe de temps à autre des traînées où une orientation préférentielle des phyllites donne lieu à une biréfringence plus notable.

Les grains de quartz sont assez nombreux. On en trouve de toutes les tailles entre 5 et 100 μ . La taille la plus fréquente est d'une vingtaine de μ . L'échantillon qui a été taillé en section mince contient peu de carbonates. Le seul minéral accessoire notable est de la limonite sous forme d'agrégats irréguliers. Le lavage a seulement donné une assez grande quantité de grains de sable.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'échantillon analysé ne contient ni chaux, ni dolomite, ni sels solubles dans l'eau. Les insolubles sont abondants : 16,6 %. La proportion de fer est de 0,14 %, exprimé sous forme de sesquioxyde. Le pH est 7,6.

1° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

La roche étudiée est extrêmement peu calcaire, et même certains morceaux ne le sont pas du tout. Le milieu de genèse est lacustre et les conditions de sédimentation correspondent à une boue presque uniquement argileuse. La problème posé par la détermination de la phase argileuse a été résolu par la confection de quatre diagrammes de Rayons X.

Le premier spectre a été obtenu à partir d'une plaque sédimentée à partir d'une suspension réalisée *sans aucun traitement*, l'élimination des cations étant faite par simple lavage à l'eau. Le résultat

lat est le suivant : 15,07.TF — 10,1.f — 7,19.AF — 5,05.f — 3,59.AF — 3,38.f. Ces lignes indiquent un mélange de Montmorillonite et de Kaolinite (pl. VII, 8).

Le deuxième spectre a été fait sur une poudre obtenue après traitement au chlorure de magnésie. La raie à 15 A° subsiste, rendue moins nette par la nature du spectre de poudre et non de plaquette.

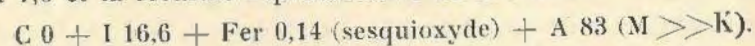
Le troisième spectre a été fait sur une poudre après traitement à l'ammoniaque : un anneau épais apparaît entre 13 et 10 A°. La Kaolinite n'apparaît sur cet échantillon qu'à l'état de traces.

Le quatrième spectre a été fait sur une plaquette préparée de la même manière que pour le premier, mais traitée au glycérol. Les écarts réticulaires mesurés sont : 17 A°.TF — 10 floue — 8,80 floue — 7,15.F — 5,80.f et floue — 4,48.f — 3,59.F — 2,97.m. Ceci montre certaines équidistances caractéristiques de la Montmorillonite glycérolée avec celles de la Kaolinite. Ce dernier minéral apparaît donc très nettement dans 3 spectres sur 4, mais ayant eu l'occasion de faire des essais de méthodes sur la terre de Donnery et d'obtenir 5 autres spectres non décrits ici, il faut remarquer que la Kaolinite est apparue sur les 5 d'une manière parfaitement nette.

En conclusion de ces essais je dirai que l'Argilite de Donnery contient dans sa phase argileuse 30 % de Kaolinite mêlée à de la Montmorillonite.

5° CONCLUSION.

Le milieu de genèse est continental. Les conditions de sédimentation sont celles d'une boue lacustre très pauvre en calcaire. Le pH est 7,6 et la formule représentative de la roche :



— 61 —

BURDIGALIEN INFÉRIEUR GERGOVIE (Puy-de-Dôme) Argilite calcaire verte

*Illustration : Photo plaque mince, planche I, figure 3.
Spectre planche VII, figure 9.*

1° GITE ET PALÉOGÉOGRAPHIE.

L'échantillon a été prélevé dans les assises miocènes du Plateau de Gergovie, qui sont intermédiaires entre l'assise pépéritique et les couches du basalte supérieur. Une coupe détaillée de la série burdigalienne est donnée par MICHEL (286 bis). Au sommet de cette série, se trouvent des marnes vertes en plusieurs couches alternantes. Certaines de ces couches contiennent une faune de Mélanies, Unios, Planorbis, Helix qui caractérisent parfaitement le milieu lacustre. D'autres couches sont stériles. Dans l'ensemble, on a donc affaire ici à un milieu de sédimentation continental et lacustre calcaire.

2° EXAMEN MACRO ET MICROSCOPIQUE.

L'échantillon a été prélevé au-dessus du replat pépéritique. En grattant légèrement le sol superficiel, on met à nu une argile très peu calcaire, massive et vert très foncé. Elle se débite en morceaux polyédriques assez réguliers qui subsistent avec leur forme au séchage. L'effervescence est extrêmement discrète.

Au microscope, l'aspect est tout à fait particulier. Les textures normale et parallèle à la stratification sont identiques. La phase argileuse n'est pas masquée car les carbonates sont groupés en agrégats. Elle apparaît sous forme de flocons sphériques de 50 à 100 μ à peu près isotropes. Chacun de ces flocons est entouré de phyllites très faiblement biréfringentes mais tout de même actives sur la lumière polarisée. Enfin, les flocons, de-ci, de-là, sont des agrégats de calcite de 20 à 60 μ , formés de grains de CO_3Ca extrêmement ténus. Certains de ces agrégats calcaires sont ronds et leur centre est occupé par de la limonite. De la limonite sphérique est visible dans toute l'étendue de la plaque. Enfin, on peut mesurer quelques petits quartz de 10 à 20 μ mais ils sont extrêmement rares. On peut considérer l'Argilite de Gergovie comme la roche qui a donné, parmi toutes celles que j'ai étudiées, la texture floconneuse la plus nette (planche I, figure 3). Je ne vois pas pour l'instant d'interprétation de

cette texture. On pourrait songer qu'il y a là la trace de certains modes de sédimentation actuelle (31) par dépôts de flocons. Mais on saisit mal comment la diagénèse aurait pu respecter des textures aussi fragiles.

3° ANALYSE DE LA ROCHE.

L'argilite verte de Gergovie est pauvre en calcaire. On peut y doser 9,10 % de CO_3Ca . La teneur en magnésie est de 1,88 % et ne correspond pas à la présence de dolomite. Le pourcentage d'insolubles est très faible : 0,4 % et celui du fer est égal à 0,35 % exprimé sous forme de sesquioxyde. Le pH est 7,8.

4° ANALYSE DE LA PHASE ARGILEUSE.

L'analyse aux Rayons X de la phase argileuse a été faite sur une plaquette sédimentée à partir d'une suspension dispersée à l'ammoniaque. Les distances réticulaires calculées à partir des lignes mesurées sont : 9,9.TF — 5.m — 4,48.m circulaire — 3,33.TF — 2,57.f — 1,99.m — 1,50.f. L'aspect des lignes à 10 Å est celui de l'accrochage typique. Les équidistances sont caractéristiques de l'illite pure. Le quartz a été complètement éliminé; on ne voit aucune trace de Kaolinite ni d'Hydrobiotite. Il semble que ce minéral soit l'illite la plus pure et la plus typique qui ait été rencontrée au cours de cette étude (pl. VII, 9).

Deux analyses thermiques ont été faites il y a bientôt dix ans par ALEXANIAN, cité dans MICHEL (286 bis). Elles avaient fait songer à un minéral du groupe de l'Attapulgitite. Il est possible que l'Attapulgitite existe aussi dans la série burdigalienne de Gergovie. Cependant l'essai aux Rayons X décrit ci-dessus a été fait sur un échantillon communiqué en 1945 par M. MICHEL et qui doit appartenir au même lot. Il se révèle être une Illite franche. Il faut songer par ailleurs que l'interprétation des courbes thermiques est bien délicate sur les phases argileuses extraites des roches sédimentaires sans l'appui des Rayons X. Quelques essais sur d'autres échantillons préciseront ce petit problème.

5° CONCLUSION.

Le milieu est continental et correspond à un lac calcaire. Le pH est 7,8. La formule représentative de la roche est :

C 9,10 + I 0,4 + Fe 0,35 (sesquioxyde) + A 90 (I).

CHAPITRE SEPTIÈME

LOIS STATISTIQUES

Variations des caractéristiques pétrographiques en fonction des conditions de sédimentation.

Ce chapitre est destiné à grouper les faits énumérés dans les chapitres précédents. Il apparaît en effet des coïncidences entre certains d'entre eux et des oppositions.

On parvient, en réunissant les faits semblables, à des lois statistiques intéressantes.

I. Variations de la nature des minéraux argileux extraits des roches sédimentaires.

Ce paragraphe est destiné à montrer les variations de la nature et de la proportion des minéraux argileux révélés dans la phase argileuse extraite des roches sédimentaires, par les différents essais aux Rayons X et l'analyse thermique.

Pour chacun des milieux de genèse considérés, le même plan sera suivi :

- A) Vue d'ensemble sur les échantillons étudiés.
- B) Résultat global.
- C) Possibilités de précisions.

1° LES ROCHES D'ORIGINE MARINE.

A) Vue d'ensemble sur le groupe.

23 roches ont été étudiées, classées du n° 1 au n° 22 (en tenant compte de Crévic n° 3 bis). Il faut mettre tout à fait à part l'échantillon n° 20 qui est un grès vert de l'Albien. Le minéral argileux qu'on trouve dans cette roche est la glauconie. Cet essai a été fait comme expérience témoin qui sera utilisée plus loin.

Il faut mettre à part également Crévic n° 3 bis. Appartenant aux marnes de Levallois (Rhétien), le problème posé par cette roche et par cet horizon stratigraphique a déjà été évoqué (page 135). Le milieu de genèse n'est pas défini, a fortiori les conditions de sédimentation. Cet échantillon a été étudié pour essayer les possibilités d'une réciproque.

Pour les 21 roches qui restent, les études détaillées exposées dans la deuxième partie donnent une certitude sur leur origine marine.

B) Résultat global.

Le résultat global des essais de Rayons X combinés avec les expériences de chauffage et l'analyse thermique est que la phase argileuse extraite des roches d'origine marine est composée :

- 1° d'Illite généralement dominante;
- 2° de Kaolinite souvent présente;

3° de micas hydratés des types Hydrobiotite-Vermiculite, à titre de minéraux secondaires.

4° de Chlorite à titre de minéral secondaire.

Les trois premiers composés sont présents dans toutes les roches étudiées, sauf une : la craie marneuse de Senonches qui contient de la Montmorillonite pure.

La Chlorite n'est certaine que dans 11 roches sur 21. Il fallait pour l'affirmer soit que la raie à 4,70 Å soit visible, soit que la raie à 14 Å résiste à l'action de la chaleur, ce qui est difficile à observer dans le flou central.

Pour apprécier les proportions, la méthode exposée page 106 a été utilisée. L'ensemble des minéraux bâtis sur le type mica a été groupé sous une seule rubrique et c'est cette somme qui est opposée à la Kaolinite. La proportion de minéraux micacés varie de 50 à 100 % du total, ce qui revient à dire que la proportion de Kaolinite dans le mélange varie de 0 à 50 %. Ces estimations sont valables à 10 % près en l'état des techniques utilisées ici.

C) Possibilités de précision.

Si le milieu de genèse pour ces roches est certainement marin, les conditions de sédimentation sont aussi certainement variables, comme en témoignent les caractéristiques pétrographiques diverses qui ont été mises en évidence. C'est pourquoi on est tenté de préciser un peu plus et de rechercher si un lien plus étroit relie les conditions de sédimentation aux proportions de minéraux argileux. Ceci est difficile car il faudrait des centaines d'essais dont on ne dispose pas encore pour pouvoir affirmer. Aussi bien, on n'affirmera rien, mais on dira :

a) Il semble que la forte teneur en carbonates (n° 1, 2, 5, 14, 18, 22) fait augmenter la proportion de minéraux micacés. Celle-ci varie de 70 à 100 %.

b) Il faut remarquer que la roche marine la plus calcaire qui a été étudiée et qui est la craie de Senonches (E.-et-L.) n° 22 contient de la Montmorillonite à peu près pure. Il y a donc bien là 100 % de minéraux micacés mais sous une forme particulière. Je ne peux expliquer aujourd'hui cette particularité.

c) Il semble que la forte teneur en pyrite qui caractérise les roches nées en milieu réducteur augmente la proportion de Kaolinite. Ceci est surtout net pour les échantillons n° 4, 6, 7, 8, 10, 12, 15, 16, 21 où la Kaolinite paraît souvent dominante au premier examen. Même après addition de tout ce qui revient au réseau micacé, la Kaolinite reste égale à 50 % dans les roches n° 7, 8 et 10, et ne

tombe qu'à 40 % pour les autres échantillons. C'est-à-dire que sa proportion reste très sensible.

2° ROCHES D'ORIGINE LAGUNAIRE.

A) Vue d'ensemble sur le groupe.

Parmi les 25 roches étudiées, la majorité est formée de sédiments d'origine lagunaire certaine. Si l'on peut parler d'influences marines pour certains (échant. n° 30, 38, 42); si l'on peut songer à des lacs saumâtres pour d'autres (échant. n° 36, 43, 44); il s'agit cependant dans l'ensemble de ce que les géologues ont l'habitude d'appeler le milieu lagunaire, c'est-à-dire le milieu où les eaux sont très salées ou sursalées jusqu'à précipitation de sels figurés. Ceci est une convention de langage, mais elle est communément admise.

B) Résultat global.

La phase argileuse extraite des roches d'origine lagunaire est composée en grosse majorité de minéraux micacés : Illite, Hydrobiotite-Vermiculite, Chlorite, rarement Montmorillonite. Accidentellement elle est formée d'Attapulгите ou de Sépiolite qui sont des minéraux cristallographiquement voisins. La Kaolinite n'intervient que dans certains cas et pour une part faible. Les minéraux de beaucoup les plus fréquents sont l'Illite et les Hydrobiotites-Vermiculites. Les proportions ont été appréciées.

a) La Kaolinite est en proportion presque nulle dans 19 des roches étudiées.

b) La Kaolinite est en proportion voisine de 10 % dans 4 autres roches.

c) La Kaolinite n'atteint 20 à 30 % que dans 2 roches sur 25.

On est autorisé à parler d'exception. On en recherchera une explication.

d) L'Illite est le minéral dominant dans 17 sur 25 roches.

e) La Montmorillonite est le minéral dominant dans 4 sur 25 roches.

f) La Chlorite existe d'une manière secondaire dans 5 sur 25 roches.

g) Les Hydrobiotites-Vermiculites accompagnent souvent l'Illite.

h) L'Attapulгите ou la Sépiolite sont dominantes dans 3 sur 25 roches.

Ainsi le résultat global est nettement énoncé. La phase argileuse extraite des roches d'origine lagunaire est composée principalement et souvent exclusivement de minéraux bâtis sur le type mica.

C) Possibilité de précisions.

La locution de « milieu lagunaire » est évidemment vague. Dans les milieux lagunaires qu'on peut aujourd'hui connaître ou qu'on a la possibilité de reconstituer pour le passé, les conditions de sédimentation peuvent avoir varié assez considérablement. C'est pourquoi on peut espérer qu'un jour viendra où l'on pourra relier les différences des produits sédimentés aux différentes conditions régnantes dans leur milieu d'origine.

Pour l'instant les documents sont peu nombreux, mais on proposera les remarques suivantes :

1° On peut expliquer la présence de 10 à 30 % de Kaolinite dans la marne bleue de Corneilles-en-Parisis n° 38 et dans la marne verte de Fresnes n° 42 par les influences marines qui sont plausibles dans ces niveaux aux yeux des géologues. L'influence marine fait réapparaître les associations minérales analogues à celles qui ont été décrites dans les roches d'origine marine, et en particulier la Kaolinite.

2° On peut expliquer la présence de 30 % maximum de Kaolinite dans la marne de Pechelbronn par une convergence des conditions de sédimentation avec celles du milieu marin. En effet les incursions marines paraissent improbables aux stratigraphes dans ce niveau. Par contre, ils admettent que des épisodes réalisant des conditions de sédimentation semblables à celles de la mer peuvent se produire accidentellement (280). Ceci est plausible étant donnée la présence de la Glaucanie. On notera de plus la présence assez abondante de la Pyrite, ce qui réalise une convergence intéressante avec les marnes bleues marines qui sont les plus riches en Kaolinite.

3° On reviendra sur le problème des roches à Attapulгите et Sépiolite. Dès maintenant on peut remarquer que ces minéraux surviennent dans des niveaux où les conditions de sédimentation sont aussi lacustres que lagunaires. Les bassins de Salinelles et de Mormoiron ont des caractères lacustres accusés et on ignore comment les lacs ont été modifiés pour permettre la sédimentation de minéraux aussi curieux et exceptionnels. On parle d'eaux saumâtres mais cette locution verbale ne représente pour l'instant rien de précis.

3° ROCHES D'ORIGINE LACUSTRE AUX EAUX DOUCES OU AGRESSIVES.

A) Vue d'ensemble sur le groupe.

On a étudié 9 roches nées dans des bassins continentaux où les eaux étaient douces ou agressives; de toutes façons acides. On sait d'ailleurs que ce sont de tels bassins que sont extraites les argiles

réfractaires dont il est connu depuis l'origine des recherches sur les argiles qu'elles doivent leur réfractarité à la présence de la Kaolinite. Ces 9 essais ont été faits pour servir de témoins d'un milieu de sédimentation spécial, il est évident que des centaines d'essais auraient pu être faits sur ces « Kaolins sédimentaires ».

B) Résultat global.

Le résultat qu'on prévoit est que la Kaolinite domine largement dans la phase argileuse extraite de ces roches sédimentaires.

Les minéraux argileux micacés n'y existent qu'en minorité et généralement en faible minorité : de 0 à 30 %. Au premier rang de ceux-ci se trouvent l'illite, puis parfois un minéral à 14-15 Å, dont il faudra préciser la nature par la série des tests qui ont été utilisés.

Néanmoins, comme ces minéraux sont en faible quantité, l'opération n'est pas simple et nécessite un travail spécial. Au point de vue qui nous intéresse ici, la somme de ces minéraux à 10 et 14 Å est seule indispensable à connaître, et le résultat très net est que cette somme est faible vis-à-vis de la Kaolinite.

Il n'est pas possible, sur un si petit nombre d'essais, de tenter de préciser les choses, mais ce sera certainement utile et profitable dans l'avenir et l'on pourra peut-être saisir un lien entre l'abondance des minéraux accessoires et certaines conditions de sédimentation.

1° ROCHES D'ORIGINE LACUSTRE CALCAIRE.

A) Vue d'ensemble sur le groupe.

6 roches ont été étudiées ici. Quand après quelques années de travail, j'ai vu se dessiner une loi de la répartition des minéraux argileux en fonction de milieu de genèse des roches, j'ai songé à étudier les marnes lacustres. Or ces niveaux n'existent pas en Lorraine. J'ai donc fait appel à des géologues ayant des chances d'en posséder dans leur collection. C'est ainsi que M. BOURCART et M. LUCAS m'ont fait parvenir quelques marnes lacustres. MM. ROQUES et MICHEL, de Clermont-Ferrand, m'ont guidé sur le terrain pour prélever les autres. Le total de 6 est modeste. L'avenir complètera, mais déjà on peut voir un résultat se dessiner.

B) Résultat global.

Si l'on met à part l'échantillon d'Herbéville, la phase argileuse extraite de roches nées en milieu lacustre calcaire, est formée, en grosse majorité, de minéraux micacés. Sur un lot d'échantillons aussi peu nombreux aucune généralisation n'est possible. On doit signaler seulement que les échantillons donnent une proportion

voisine de 100 % de minéraux micacés, sauf pour un (Donnery n° 60).

C) L'échantillon Herbéville.

Unique en son genre se trouve ici l'échantillon d'Herbéville trouvé dans une roche feuilletée incluse en petits lits de 2 à 4 cm. dans une série de calcaires lacustres lutétiens de l'Ouest de la Seine-et-Oise. Cet échantillon contient de l'Attapulgite. On revient au problème délicat de la genèse de ces minéraux, sur lequel on ne peut que raisonner prudemment (voir plus loin).

5° RÉSULTATS GÉNÉRAUX.

Il est facile de représenter la courbe de fréquence des minéraux argileux dans la phase argileuse extraite des roches sédimentaires en fonction de leur milieu de genèse. Pour ce faire un graphique sera construit. En abscisse sera portée la proportion de minéraux entre 100 % de Kaolinite et 100 % de minéraux micacés. En ordonnée sera porté le nombre d'échantillons ayant la même constitution; celle-ci étant comptée de 10 en 10 %. Chaque point représentatif sera affecté d'une lettre représentant son milieu d'origine. M eau de mer, S eaux salées ou sursalées, D eaux douces ou agressives, C eaux lacustres calcaires. Il ne sera pas tenu compte dans cette statistique des roches où ont été trouvées l'Attapulgite et la Glau-

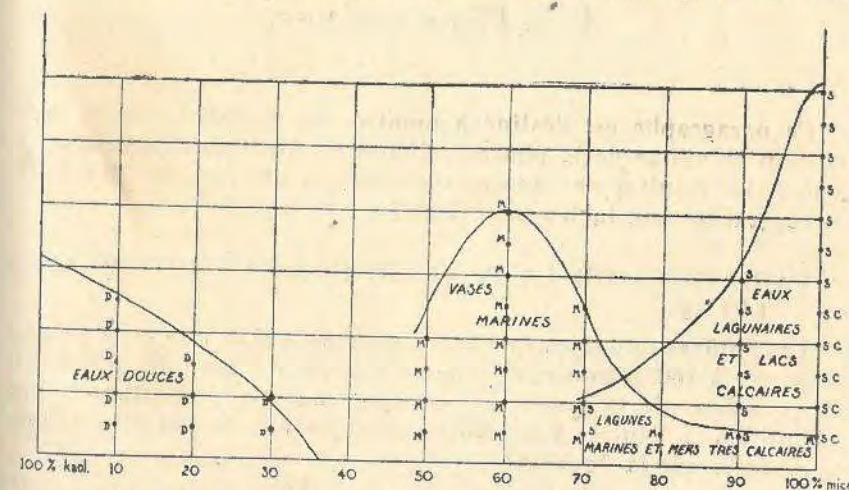


FIGURE 14. — Variations de la nature des minéraux argileux avec les milieux de genèse. A gauche 100 % de kaolinite. A droite 100 % de minéraux micacés. En ordonnée est porté le nombre d'échantillons pour chaque teneur comptée de 10 en 10 %. Cette courbe de fréquence fait apparaître 3 cloches selon le milieu de genèse.

conie, bien que ces minéraux soient exclusifs de la Kaolinite et aient des conditions de genèse analogues à celles des minéraux micacés.

Le graphique obtenu (figure 14) montre trois lots. Le lot de roches nées en eaux douces acides est tout à fait isolé. Le lot de roches nées en milieu lagunaire est, à l'opposé, constitué de minéraux micacés largement dominants. Intermédiaires, mais, avec une dominance des minéraux micacés, se trouvent les roches nées à partir de vases marines. Les roches nées en milieu lacustre calcaire, et représentées par la lettre C, se trouvent dans la zone des roches lagunaires. On voit aussi une zone où se superposent certaines roches marines et certaines roches lagunaires. Il s'agit de roches marines très calcaires et des roches lagunaires ayant subi ou mimé des influences marines. Ici les phases argileuses deviennent similaires alors que les milieux sont différents : on verra que les conditions de sédimentation convergent.

II. Variations de la composition chimique de la Phase argileuse.

Ce paragraphe est destiné à montrer les variations de la composition chimique de la phase argileuse en fonction des milieux de genèse. Le résultat des analyses chimiques qui ont pu être faites est représenté aux tableaux n° 7 et 8.

1° VARIATIONS DE LA POTASSE DANS LA PHASE ARGILEUSE.

Les chiffres du tableau n° 9 correspondent à la teneur en potasse rapportée à 100 grammes de silicate déshydraté, ceci afin d'éliminer les variations de la teneur en eau qui sont trop importantes d'un échantillon à l'autre. Ces chiffres ont permis de bâtir la courbe représentée sur la figure n° 15.

Les teneurs en K₂O ont été arrondies arbitrairement aux valeurs croissantes d'une demi-unité pour cent. Puis la courbe de fréquence a été faite. On voit que la courbe dessine dans la zone des fortes teneurs supérieures à 3 % en K₂O une double cloche. La cloche la plus basse correspond à la phase argileuse extraite des roches ma-

rines, la plus haute à la phase argileuse extraite des roches lagunaires. Une seule exception : Bainville-aux-Miroirs (n° 31) qui con-

T A B L E A U N° 9
Poids de Potasse à de Magnésie pour 100 grammes de silicates déshydratés et Rapport SiO₂ Sesquioxides

N°	NOM de la Roche	K ₂ O% sec	MgO% sec	SiO ₂ Sesq.	N°	NOM de la Roche	K ₂ O% sec	MgO% sec	SiO ₂ Sesq.
2	Heming	5,66	7,71	3,97	28	Houseras rouge	6,63	3,26	3,89
3	Gironcourt	3,85	1,81	4,36	30	Damelevières	7,15	0,84	4,69
4	Xeuilley marne	4,41	2,35	3,90	31	Bainville aux Miroirs	3,21	13,30	3,29
5	Xeuilley calcaire	4,66	2,70	4,20	32	Rosières aux Salines	5,83	8,61	5,52
7	Nancy E.N.S.G.	4,55	3,11	4,35	33	Domjulien rouge	7,17	3,85	4,14
8	Jeandelaincourt	3,42	3,21	3,38	34	Domjulien vert	5,99	4,49	4,21
10	Schiste Carton Nancy	3,67	1,76	4,46	41	Ensisheim	6,26	2,99	3,80
12	Chasnigneulles	4,82	2,58	3,32	47	Somancourt	4,01	0,34	2,70
15	La Seigne (Doubs)	5,01	6,98	5,77		Carrière Sachot Couche 4	0,68	0,65	2,78
16	Baronnes Marne	4,44	2,66	3,73		Salins Couche VI	1,78	1,81	3,78
17	Ecoroues Calcaire	4,82	2,80	4,26		Repentailles Couche II	1,63	0,44	2,19
19	Louvemont	4,42	2,24	3,33		Lerol	0,70	0,28	1,95
21	Mossains Marne	3,93	1,62	4,37		Uzés	0,27	0,46	1,99
23	Pexonne vert	7,74	4,90	3,95		Les Eyzies	1,33	1,01	2,90
24	Pexonne rouge	6,95	4,44	3,33		Saint Avit Senieur	0,84	0,17	2,07
25	Dayvillers rouge	6,52	3,60	2,56	VOUF	Mussidan	0,97	0,30	2,37
26	Dayvillers vert	7,02	3,08	5,36	383	Conté	0,60	0,62	2,33

tient de la Montmorillonite et est sensiblement moins potassique que les autres.

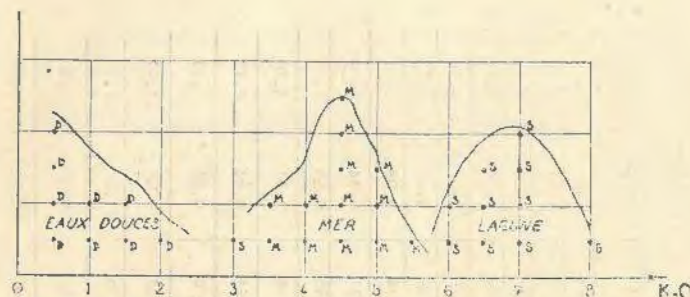


FIGURE 15. — Variations de la teneur en potasse dans la phase argileuse des Roches sédimentaires. Courbe de fréquence. En abscisse sont portés les poids de potasse pour 100 gr. de silicates déshydratés. En ordonnée est porté le nombre d'échantillons pour chaque teneur arrondie aux valeurs croissantes d'une 1/2 unité pour 100.

Il est évident que cette variation de la proportion de potasse obéit à la proportion de minéraux micacés et principalement de l'Illite dans le stock argileux extrait des roches.

Par comparaison quelques teneurs en potasse de roches continentales nées en eaux acides ou agressives ont été disposées sur la courbe à partir d'analyses anciennes trouvées dans la bibliographie (VOGT, 384; LAVEZARD, 222). Le tableau n° 9 en donne les caractéristiques.

Ces chiffres correspondent à une troisième cloche qui montre une teneur en potasse très faible et une teneur en Kaolinite très grande. Le tableau n° 9 montre que l'argile kaolinique de Somman-court qui contient 30 % d'Illite, contient déjà 4 g. de potasse pour 100 g. d'argile déshydratée. Ceci prouve que les intermédiaires existent et sans diminuer la valeur du schéma, empêche de le tenir pour général et rigoureux.

2° VARIATIONS DE LA TENEUR EN MAGNÉSIE DE LA PHASE ARGILEUSE.

Les résultats sont beaucoup moins nets, ainsi qu'on peut le voir sur le tableau n° 9 et sur la figure n° 16. On pouvait s'attendre, et quelques essais préliminaires l'avaient laissé penser (289), à ce que les roches lagunaires aient contenu une phase argileuse plus magnésienne que les roches marines. En fait, les points aberrants sont assez nombreux. Les trois roches qui ont la plus forte teneur en magnésie silicatée sont : Bainville-aux-Miroirs n° 31, Domjulien

rouge et Domjulien vert n° 33 et 34. Ces trois roches sont lagunaires. La première contient une forte proportion de Montmorillonite, qui est un minéral fréquemment magnésien. Les deux secondes sont nées en milieu lagunaire magnésien. On peut se demander pour ces deux dernières si une part de la magnésie dosée ne correspond pas à un résidu carbonaté; mais ceci est peu probable parce que l'analyse chimique n'a pas révélé de CO_2 . Les deux roches qui viennent ensuite dans l'ordre des teneurs en MgO décroissantes sont Héming n° 2 et La Seigne n° 15, qui sont des roches marines non dolomitiques. La magnésie dosée est donc bien silicatée.

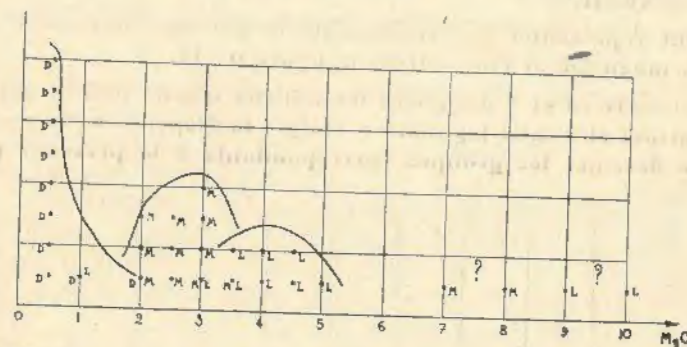


FIGURE 16. — Variations de la teneur en magnésie dans la phase argileuse des roches sédimentaires. Courbes de fréquence. En abscisse sont portés les poids de magnésie pour 100 gr. de silicates déshydratés. En ordonnée est porté le nombre d'échantillons pour chaque teneur arrondie aux valeurs croissantes d'une 1/2 unité pour 100 (D : eaux douces, M : eaux marines, L : eaux sursalées).

Ensuite les choses sont plus claires; il se trouve un groupe de roches lagunaires autour de 4 % de magnésie et un groupe de roches marines autour de 2,5 %. Enfin un nouveau point aberrant, celui de Damelevières n° 30, qui est lagunaire et contient 0,71 % de MgO .

On voit donc que le critère n'est pas sûr. Une amorce de loi statistique peut être faite mais elle ne peut être généralisée. Elle ne pourra être vérifiée que sur de nombreux échantillons, en prenant toutes les précautions pour que la magnésie carbonatée soit éliminée. On doit vérifier aux Rayons X le départ total des carbonates avant de livrer la prise au chimiste. Par comparaison, les teneurs en magnésie sur des argiles de VOGT et LAVEZARD (tableau 9) ont été portées sur le graphique, ainsi que celle de Somman-court. Dans l'ensemble les roches nées en milieu acide ont une teneur en magnésie inférieure à 1 %, et ceci fait apparaître sur la figure n° 16 une troisième ébauche du côté des basses teneurs en

magnésie qui, elle, est parfaitement nette. Elle correspond au lessivage des cations dont on a souvent parlé.

Ainsi la variation de la teneur en magnésie avec le milieu de genèse souffre des exceptions. On voit pourtant se dessiner l'ébauche de groupes de roches de plus en plus magnésiennes dans leur phase argileuse, en allant du milieu lacustre au milieu marin, puis lagunaire.

3° VARIATIONS DE LA POTASSE EN FONCTION DE LA MAGNÉSIE.

On peut représenter la variation de la potasse en fonction de celle de la magnésie et l'on obtient la figure n° 17.

Les lettres D, M et S désignent les milieux d'eaux douces acides, d'eaux marines et d'eaux lagunaires. Malgré la dispersion des points, on voit se dessiner les groupes correspondants à la présence plus

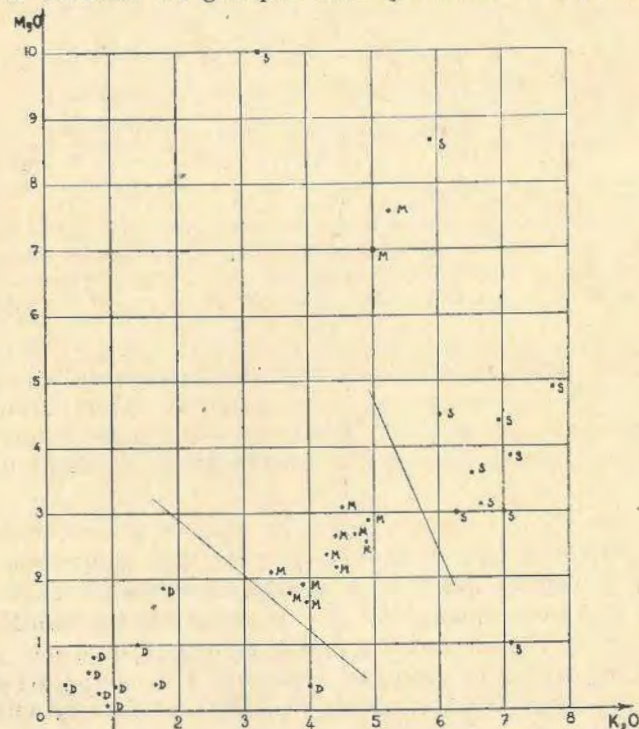


FIGURE 17. — Variations de la teneur en magnésie en fonction de la teneur en potasse dans la phase argileuse des roches sédimentaires. La magnésie et la potasse sont exprimées par leur poids pour 100 gr. de silicates déshydratés. (D : eaux douces acides, M : eaux marines, S : eaux sursalées).

importante des minéraux micacés d'un groupe à l'autre. Il suffit pour que ce schéma soit utilisable, que les proportions ne soient point anormales à la fois pour la magnésie et pour la potasse.

Il est évident que cette répartition des minéraux argileux extraits des roches sédimentaires en groupes de composition chimique différente, est calquée sur la composition minéralogique. L'abondance de la Kaolinite baisse les proportions de potasse et de magnésie. L'abondance des minéraux micacés les augmente.

4° VARIATIONS DU RAPPORT $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq.}}$

Dans le lot des phases argileuses extraites des roches marines, le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq.}}$ varie de 3,32 à 5,77; la moyenne est 4,11. Pour les

roches lagunaires, le même rapport varie de 2,58 à 5,36; la moyenne est 4,07. Pour l'ensemble, la moyenne est 4,09. Il est évident qu'il faut tenir compte pour l'interprétation de ces résultats de la proportion de quartz fin contenu dans la phase fine envoyée à l'analyse chimique. La moyenne d'ensemble donne le rapport qui est caractéristique dans les minéraux argileux micacés.

Par opposition la moyenne du rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Sesq.}}$ dans les 10 roches lacustres qui servent de référence est de 2,44, chiffre beaucoup plus voisin de 2, qui est le chiffre qui caractérise la Kaolinite.

CONCLUSION.

Les données de l'analyse chimique confirment celles de l'analyse aux rayons X. C'est surtout la variation du potassium qui témoigne bien des différences de milieu d'origine des phases argileuses extraites des roches sédimentaires. Les variations de la composition chimique de la phase argileuse extraite d'une roche sédimentaire sont un reflet des variations des mélanges minéralogiques qu'elles contiennent.

On peut ajouter la remarque suivante : la présence d'ions alcalins ou alcalinoterreux détermine pour une part importante la réfractarité d'une argile car ce sont des « fondants ». La réfractarité apparaît donc comme liée à un haut degré aux conditions de genèse et les argiles réfractaires essentiellement kaoliniques sont caractéristiques des milieux de genèse acides.

III. Variations du pH actuel des roches sédimentaires argileuses.

Ce paragraphe est destiné à montrer les variations du pH actuel des roches. Ce pH a été mesuré de la manière exposée dans la première partie (page 74). Ceci permet d'obtenir une caractéristique fidèle de la roche. Avant de décrire les mesures faites ici, on rappellera les essais faits dans cette voie antérieurement.

1° TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LE pH DES ROCHES.

P. URBAIN, en 1933 (368) a appliqué la notion de pH aux problèmes posés par la géologie, et en particulier aux phénomènes de la kaolinisation, de la latéritisation et de la silicification. Pour le point qui nous intéresse ici il a mesuré en 1937 (372) le pH des suspensions formées par les sédiments marins de la série liaso-jurassique du Calvados. Il les a trouvées intermédiaires entre 7,6 et 8,5 et a remarqué que ces valeurs étaient voisines de celles des mers actuelles.

M. Deriberé, en plusieurs publications de la même époque (90-91-92) a noté le pH de boues tourbeuses ou sulfurées qui peut descendre à 4, alors qu'en milieu calcaire ou salé on atteint pH 8,5. Les argiles de décalcification de l'Aven d'Ornag ont donné un pH variant de 7,6 à 8,3.

Enfin, SHUKRI en 1941 (348) a étudié des shales marins du lias inférieur du Yorkshire. Il a montré que le pH varie avec la distance à la surface de l'endroit où l'échantillon était prélevé; les phénomènes d'altération ont donc une grande importance. Indépendamment de cette cause d'erreur il a trouvé pour trois affleurements des pH variant entre 7,6 et 8,6 et a souligné la coïncidence entre ces valeurs et celles qui sont fournies par l'eau de mer actuelle.

2° ROCHES D'EAUX DOUCES OU AGRESSIVES ACIDES.

On a étudié dans ce travail 9 roches argileuses sédimentaires originaires de bassins continentaux lacustres et fluviolacustres où des eaux douces ou agressives les ont déposées. Le pH actuel de ces roches varie de 3,7 à 5,9. La moyenne est 4,72. Le petit nombre de ces échantillons vient de ce qu'ils sont destinés dans ce travail à servir de témoins vis-à-vis des essais plus nombreux faits par ailleurs. Mais pour la mesure du pH qui n'est pas une opération difficile, un complément d'information a été recherché.

Le Professeur A. LANQUINE a mis sa collection à notre disposition de la manière la plus aimable. Dans la variété de ses échantillons, ont été essayés, ceux dont les conditions de genèse semblaient définies et se rattachaient à ce groupe de terres nées en eau douce ou agressive, en tous cas acide. Une quarantaine de roches ont été essayées. Leur origine est la même que celle des témoins étudiés en détail. On doit y ajouter des terres provenant du bassin du crétacé supérieur du Gard, des argiles et sables bigarrés de l'éocène inférieur de diverses régions, du pliocène détritique de Saône-et-Loire, etc... Le pH est toujours acide (tableaux 10 et 11). Ce pH

TABLEAU N° 10

Mesure du pH de roches argileuses nées en milieu continental acide

COLLECTION	ECHANTILLON	ETAGE	pH
A. LANQUINE	PROVINS.- Terre pour verrerie et glacerie I.C.-	Sarnacien	5
-	PROVINS.- Terre pour produits réfractaires C.V.-	Sarnacien	6,3
-	PROVINS.- Argile à faïence K.S.B.-	Sarnacien	5,8
-	LA FOLLEVILLE.- (passage latéral à Arkose de Breuille.)	Sarnacien	4,8
-	ARCUEIL.- Bariolée	Sarnacien	5
-	ARCUEIL.- Noire	Sarnacien	2,5
-	ANGERVILLER.- Terre blanche	Sarnacien	6
-	ANGERVILLER.- Terre grise	Sarnacien	4,4
-	ANGERVILLER.- Bariolée	Sarnacien	4
-	PROVINS : Sept Veuille	Sarnacien	5,6
-	PROVINS : Les Grands Fleux	Sarnacien	5,4
-	FLEURY-SUR-LOIRE (Nièvre)	Rhétien	5,8
-	SAINT-GEORGES (Mussidan)	Sidérolitique	4
-	ARLEUX (Belgique)	Sarnacien	5,2
-	CLERAC	Sidérolitique	3,3
-	HOUDAN	Sarnacien	4,3
-	SAINT-MARIE (Provins)	Sarnacien	4,8
-	MARSAC	Sidérolitique	5
-	NEUVIC	Sidérolitique	3,8
-	LES EYZIES-LA-CAZOLE	Sidérolitique	3,8

varie de 2,5 à 6,7. Plusieurs, parmi les plus acides, contiennent des acides humiques en proportion notable.

Les pH extrêmes pour ces essais sont 2,5 à 6,7.

La moyenne de l'ensemble est 4,7.

TABLEAU N° 11

Mesure du pH de roches argileuses nées en milieu continental acide (Suite).

COLLECTION	ECHANTILLON	ETAGE	pH
A. LANQUINE	PARAY-LE-MONIAL	Pliocène	4,6
-	WESTERWALD : argile bariolée	Aquitainien	4,0
-	BEAULON près Dieu (réfractaire N° 5)	Pliocène	4,4
-	CAUD (Préme)	Turonien	5,7
-	SAINT-CHERON . (OM)	Sparnacien	3,8
-	MONTENDRE	Sidérolitique	3,5
-	LE BREUILLET (T.V.)	Sparnacien	4,5
-	SEZANNE N° 1	Sparnacien	5,6
-	POÛT LAVAL (Drôme)	Eocène inf.	6,7
-	BELLEVEU (Paray-le-Monial) argile bigarrée	Pliocène	4,3
-	DIEULEFIT		4,0
-	Région MONTEREAU. Argile sa- bleuse.	Sparnacien	3,2
-	FLEURÉ	Sparnacien	5
-	PUMEL (Lot)	Sidérolitique	5,2
-	MONTGUYON (Charente-Maritime) Terre à falence.	Sidérolitique	4,1
-	LES FONTAINETTES (Oise)	Sparnacien	4,1
-	BEAUWARD (Bassin de Provins)	Sparnacien	3,5
-	SAINT-LOUP de NAUD (Bassin de Provins)	Sparnacien	5,1
-	LES GRANDS PLEUX (Bassin de Provins)	Sparnacien	5,3
G. MILLOT	WASSY (Argile bariolée)	Barrémien	4,9

3° ROCHES D'ORIGINE MARINE, LAGUNAIRE OU LACUSTRE CALCAIRE.

a) 23 roches marines ont été étudiées en détail.

Le pH varie entre 7,2 et 8,8.

La moyenne est 7,91.

La plus grande fréquence vers 7,8.

b) 25 roches d'origine lagunaire sursalée ou non ont été étudiées en détail.

Le pH varie de 7,4 à 8,8.

La moyenne est 7,85.

La plus grande fréquence vers 7,8.

Deux exceptions inexplicables : Housseras vert pH 4,7 et Housseras rouge pH 5,4 qui figurent sur le diagramme et sont aberrants (croix noire).

c) 6 roches d'origine lacustre calcaire ont été étudiées.

Le pH varie entre 7,6 et 8,8.

La moyenne est 8.

TABLEAU N° 12

Mesure du pH de quelques roches argileuses

COLLECTION	ECHANTILLON	ETAGE	pH
A. LANQUINE	Terre à Tonettes de VILLECHROZE (Var)	Danien	7,8
-	Argile à GAN	Présence fossi- les marins	7,6
-	ARGENCES (Normandie)	Callovien	7,4
-	MARSEILLE	Sanoisien	7,3
G. MILLOT	CORNEILLES-EN-PARISIS	Marne verte	7,8
-	CORNEILLES-EN-PARISIS (entre 3ème et 4ème masse)	Marne blanche magnésienne	7,6
PERRODON	SAHARA. Argiles gypseuses du Azab.	Sénonien	8,0
-	SAHARA. Marnes et argiles Sud des Ouled Djellal.	Eocène	8
G. MACLSCHMIDT	SAINT-AUSTELL (Gornouailles)	Kaolin	5,3
E.W.S.G.	SAINT-YRIEX (Limousin)	Kaolin	4,6
-	BRETAGNE	Kaolin	4,3
-	SAXE	Kaolin	3,8
-	LOUHOSSA (Basses-Pyrénées)	Kaolin	5,9
D. MILLOT	DJEBEL DEJAR (Algérie)	Halloysite	5,3
A. LANQUINE	PLEMET (Côtes-du-Nord)	Kaolin	3,2
G. MILLOT	LES COLETTES (Puy-les-Vignes)	Kaolin	4,7
G. MILLOT	Montmorillonite Camp Bertaux	Bentonite	7,5
-	Montmorillonite Lalla Makhia	Bentonite	7,8
-	Attapulgate d'Attapulga	Type	7,8
W.P. BRADLEY	Illite de Pennsylvanie	Type	4,6

d) Quelques autres roches dont les origines sont semblables aux roches précédentes ont donné des pH analogues (tableau 12).

La moyenne est 7,8.

e) L'ensemble de ces documents donne des pH basiques variant de 7,2 à 8,8.

La moyenne générale est 7,87.

4° COURBES DE FRÉQUENCE D'UN pH CARACTÉRISTIQUE DES ROCHES SÉDIMENTAIRES ARGILEUSES.

Les résultats ci-dessus sont représentés par la courbe de fréquence de la figure n° 18. Elle accuse une double cloche. L'une correspondant aux pH acides des roches nées en milieu d'eau douce ou agressive, l'autre aux pH basiques des roches nées en milieux d'eaux marines lagunaires ou lacustres calcaires.

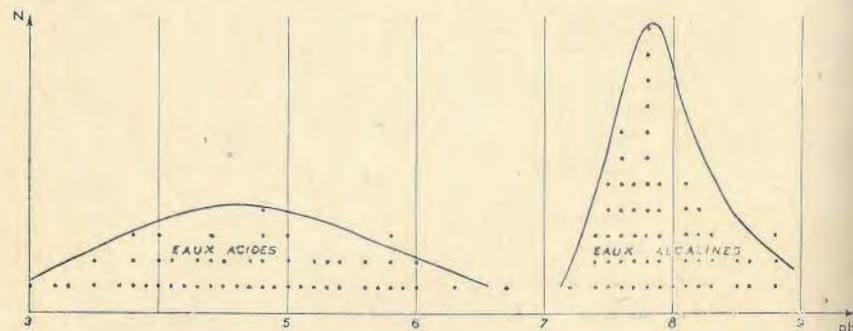


FIGURE 18. — Variation du pH des roches sédimentaires argileuses. Courbe de fréquence. Le pH actuel des roches rend compte de celui du milieu de genèse.

La dispersion des pH acides est plus grande que celle des pH basiques. Il faut en voir la raison dans la fixité relative du pH et des équilibres dans les eaux salées, alors que les lacs peuvent réaliser une grande variété de nature.

5° LOIS STATISTIQUES.

a) Il existe une coïncidence entre les conditions de milieu originel d'une roche sédimentaire argileuse et son *pH actuel*. En effet :

Le pH des roches nées en milieu continental lacustre ou fluvio-lacustre dans des eaux douces ou agressives à pH acide est aujourd'hui acide.

Le pH des roches nées en milieu marin, lagunaire ou lacustre calcaire dans des eaux alcalines est aujourd'hui alcalin.

b) On a donc le droit de parler de la fossilisation du pH d'une roche. On ignore d'ailleurs totalement dans quelle mesure la fossilisation a pu altérer une caractéristique aussi fragile depuis l'époque de la sédimentation. Il est possible que le pH originel ait été modifié au cours du temps de la même manière que les êtres vivants, par la fossilisation. Mais, de même que les êtres vivants, il reste reconnaissable après sa fossilisation.

6° COINCIDENCES ENTRE LE pH ET LE MINÉRAL ARGILEUX DOMINANT :

Une première coïncidence entre le pH actuel ou pH fossile des roches sédimentaires et leur milieu de genèse vient d'être mise en évidence. Une deuxième coïncidence peut être relevée aussitôt. Elle est plus intéressante encore. Il s'agit de la coïncidence entre le pH actuel ou pH fossile d'une roche et le minéral argileux dominant qu'elle renferme. Aussi l'on voit deux trilogies se dessiner.

La première : 1° Roches nées en milieu d'eaux douces ou agressives.
2° Kaolinite dominante.
3° pH actuel acide.

La seconde : 1° Roches nées en milieu d'eaux alcalines.
2° Minéraux dominants bâtis sur le type mica ou sur des types voisins (Illite, Glauconie, Montmorillonite, Vermiculite, Chlorite, Attapulgite, Sépiolite).
3° pH actuel basique.

Des nuances peuvent être faites et seront examinées au chapitre suivant.

7° COMPARAISON AVEC QUELQUES ROCHES CONTENANT DES MINÉRAUX TYPES.

Il a paru intéressant de comparer ces données avec quelques roches contenant des minéraux types. D'une part roches, où le minéral cardinal est la Kaolinite ou l'Halloysite comme les Kaolins naturels, d'autre part roches où le minéral cardinal est bâti sur le type mica ou sur le type attapulgite. Ces pH sont représentés au tableau 12. Le pH des Kaolins naturels est acide. Il varie de 3,8 à 5,9. La moyenne est 4,88. Le pH des roches à Montmorillonite et Attapulgite est basique. Par contre le pH de l'Illite type de Pennsylvanie est de 4,6 contrairement à celui de toutes les Illites pures rencontrées jusqu'ici. Ceci m'est incompréhensible. La seule hypothèse que je puisse faire à l'examen de la roche, c'est que celle-ci est déjà frappée d'une diagénèse avancée; en effet, elle est dure et ne fait plus pâte avec l'eau.

CONCLUSION SUR LES LOIS STATISTIQUES EXPOSÉES DANS CE CHAPITRE HUITIÈME.

- 1° La phase argileuse extraite d'une roche sédimentaire varie en fonction du milieu de genèse.
- 2° En milieu continental, où les eaux sont douces ou agressives, de toute façon acides, il y a coïncidence entre la dominance de la Kaolinite et le pH acide de la roche.
- 3° En milieu lacustre calcaire, il y a coïncidence entre la dominance des minéraux micacés et le pH alcalin.
- 4° En milieu marin, il y a coïncidence entre le pH alcalin et la présence des minéraux micacés dominants. La Kaolinite intervient et d'autant plus semble-t-il que la roche est moins calcaire ou que le milieu fut favorable à la production de la Pyrite. Le pH baisse quand la Kaolinite intervient abondamment.
- 5° En milieu lagunaire il y a coïncidence entre le pH alcalin et la présence dominante des minéraux micacés. Ceux-ci tendent à être seuls en milieu sursalé. Ils peuvent être accompagnée d'une faible proportion de Kaolinite en milieu non sursalé. Ils sont mêlés de Kaolinite si des influences marines se font sentir, ou si le milieu converge avec le milieu marin.
- 6° Les conditions de genèse des Attapulgites et Sépiolites sont moins nettes et seront examinées plus loin, mais les roches contenant ces minéraux sont nettement basiques.

CHAPITRE HUITIÈME

ESSAI SUR LA GENÈSE DES MINÉRAUX ARGILEUX. DANS LA SÉDIMENTATION.

Introduction

Ce chapitre est destiné à exposer un essai sur la genèse de la phase argileuse des roches sédimentaires, nées dans des milieux de genèse différents. Cet essai est assis sur des lois statistiques qui ont été dégagées des faits étudiés dans ce travail mais il est aussi la conséquence des innombrables travaux qui ont été faits par les nombreux savants s'occupant de sédiments, de sols, de l'altération des roches silicatées, de gîtes hydrothermaux ou ayant réalisé des synthèses au laboratoire.

I. Les roches argileuses sont-elles des dépôts détritiques fins ?

La première idée qui vient à l'esprit pour rendre compte de la genèse des roches argileuses sédimentaires est de les considérer comme des dépôts détritiques mécaniques, clastiques ou allogènes particulièrement fins. Dans la majorité des classifications des roches sédimentaires, on fait une distinction entre les dépôts d'origine détritique, chimique, et organique. En faisant cette distinction, il est bien admis que tout le matériel des sédiments provient en dernière analyse, d'apports venant des continents. Mais les dépôts détritiques se font directement, tandis que les autres se font après remaniement soit chimique (silex, phosphates, dépôts salins, etc...), soit organique (diatomite, lumachelle, etc...). Pratiquement, il a été admis, de façon commune, que les roches argileuses correspondent au dépôt des particules les plus fines venant des continents, et par là même on les considère comme des dépôts détritiques ou allogènes.

A l'opposé, GRIM, dans l'introduction d'un récent article (151), écrit : « De nombreux géologues ont eu depuis longtemps l'idée que l'argile est un produit final de l'efflorescence et constitue un matériau d'une grande stabilité. D'une façon générale ceci est tout simplement inexact. »

Et, en effet, il n'est plus possible de se rallier aujourd'hui, sans des modifications fondamentales, à la conception qui fait des dépôts argileux un sédiment allogène, fin et stable. On peut dire que les spécialistes d'argiles l'abandonnent de plus en plus. Dans cet esprit les arguments peuvent être multipliés. Ainsi, à titre d'exemple on peut remarquer que la Montmorillonite est fréquente dans les produits d'altération et en particulier dans les sols; elle est rare au contraire dans les dépôts sédimentaires et dans les roches. Les pédologues ont montré que l'ensemble de la phase argileuse des sols était « dynamique » (151), c'est-à-dire pouvait évoluer en même temps qu'évoluait le sol lui-même. BRAJNIKOV a précisément décrit dans les limons un « complexe évoluant » en fonction du milieu qui y règne (39, 40 et 41). Si les matières argileuses évoluent dans différents milieux, il n'y a pas de raison qu'elles n'évoluent pas dans les milieux de sédimentation.

J'ajouterai un argument tiré des statistiques qui ont été exposées ici. *Les roches sédimentaires argileuses ne sont pas que des dépôts allogènes puisqu'elles sont différentes dans les différents milieux de sédimentation définis. Les roches sédimentaires argileuses sont des dépôts authigènes car sur un matériel allogène quelconque le milieu imprime sa marque ou son cachet à un point tel, que le dépôt prend une physionomie qu'on peut dire caractéristique, en l'état actuel de nos recherches.*

Ce point de vue assez catégorique, qui sera nuancé, rejoint, confirme et complète toute la somme des acquisitions progressives qui ont été examinées dans le chapitre historique. On a vu que peu à peu les savants des époques successives avaient dans l'ensemble réussi à distinguer dans les roches d'origines différentes des phases argileuses différentes. Il semble qu'il ne puisse subsister de doute sur le caractère authigénique des roches argileuses sédimentaires et que P. URBAIN (376) a vu juste en écrivant en 1942 : « Les silicates hydratés ne sont pas nécessairement en possession de leurs caractères spécifiques quand ils parviennent dans les bassins de sédimentation et qu'il faut les considérer dans bien des cas (1) comme authigènes au même titre que les carbonates qui leur sont associés. »

(1) Souligné par l'auteur.

Il est pourtant nécessaire de nuancer une telle affirmation car il est évident que ce sont les eaux de ruissellement qui apportent dans les bassins de sédimentation le matériel originel qui sera modelé par le milieu au cours de la sédimentation. Très peu de choses sont connues sur la nature du matériel silicaté apporté par les eaux courantes.

On est obligé aujourd'hui, dans l'ignorance, de rester dans les données qualitatives.

Il semble qu'on peut affirmer que l'apport silicaté se fait de trois manières :

1° *Un apport détritique* de fines particules minérales en provenance de continents. L'existence de cet apport est certaine. Tous les sédiments, et en particulier les sédiments argileux, contiennent une fine fraction détritique de quartz, accompagné ou non de minéraux dits accessoires, légers ou lourds. Il est impossible de songer que ces matériaux aient pu parvenir mécaniquement au lieu de sédimentation sans que les fines particules argileuses venant d'ailleurs ne les aient accompagnées. Il n'est pas question aujourd'hui de dire que l'apport détritique en minéraux argileux ou plus généralement phylliteux est nul dans un bassin de sédimentation. Il est probablement au contraire très important mais en pénétrant dans son nouveau milieu et en se déposant, il prendra une nouvelle allure qui se révèle caractéristique.

2° *Un apport colloïdal* au sens strict du mot. C'est ici qu'on pourra ranger la silice colloïdale en fausse solution ainsi que les sols d'hydroxydes et tous les complexes organo-humiques et minéralo-humiques sur lesquels les spécialistes des sols et des vases travaillent (LAVOLLAY (224), BOURCART et FRANCIS BOEUF (31), BOURCART (32 ter). C'est peut-être ici qu'il faudrait compter les tétraèdes SiO_4 libres auxquels certains auteurs (4) attribuent une permanence après destruction des réseaux silicatés.

3° *Un apport en solution vraie*. — ROY (342) s'est livré récemment à une revue critique des littératures géologiques et chimiques sur la question de solubilité de la silice dans l'eau. Il remarque que la presque unanimité des géologues raisonne sur la silice contenue à l'état colloïdal dans l'eau naturelle à la suite des travaux chimiques de KAHLENBERG et LINCOLN, travaux qui datent de 1898. Par contre les chimistes ont démontré que la silice se trouve dans l'eau naturelle sous forme d'ions cristalloïdes. La nature de ces ions n'est pas encore bien établie mais plusieurs auteurs ont réussi des vérifications après avoir fait l'hypothèse de la présence de la silice sous forme d'ions SiO_3 . La silice a pu être dosée dans la mer où sa proportion varie avec l'abondance des diatomées (HARVEY 164). Ceci

constitue un exemple important des possibilités de transport de matériel utile à la formation de minéraux silicatés. En effet les conditions de pH peuvent changer la solubilité ou la nature de l'ion cristalloïde présent dans les eaux naturelles et amener sa précipitation. De plus, c'est sous cette forme de solution vraie que de nombreux cations sont transportés : K, Na, Mg, Ca, Fe, etc.; il n'est pas utile d'insister sur cette question.

La limite entre ces trois catégories de matériaux transportés est impossible à démarquer d'une manière nette. Les fins petits débris détritiques, surtout quand ils sont constitués de minéraux argileux, fonctionnent volontiers comme les micelles colloïdales, de même que celles-ci, en se simplifiant de plus en plus, passent sans coupure au domaine cristalloïde.

Des renseignements complémentaires sont nécessaires pour accroître nos connaissances sur les matériaux apportés aux bassins de sédimentation. On aura des indications à ce sujet par l'étude des boues actuelles. Les boues marines ont déjà livré quelques renseignements qui semblent concordants pour montrer qu'elles contiennent un mélange où l'importance de l'illite domine celle de la kaolinite, la montmorillonite étant rare. Ces renseignements sont les suivants : analyse des boues ramassées par le « Meteor » (CORRENS, 67, 13). Analyse de sédiments marins actuels (DIETZ, 94-RIVIERE, 330). Par contre exceptionnellement on trouve un kaolin marin tel que celui qui est cité dans le récent ouvrage de BOSAZZA (30).

Les boues fluviatiles ou estuariennes n'ont pas été étudiées à ma connaissance, de ce point de vue. À titre indicatif, on peut citer l'argile de terrasse fluviatile de Jeanménil, près de Rambervillers, déjà citée page 30. Elle n'est pas calcaire; son pH est neutre : 6,8 et les Rayons X montrent l'illite dominante sur la kaolinite. Il est probable que puisque les minéraux bâtis sur le type mica (illite, montmorillonite et hydrobiolite) sont de beaucoup les plus fréquents dans les roches sédimentaires des continents, dans les sols et aussi dans les produits d'altération normaux des chaînes cristallines (voir page 312) les boues mécaniques apportées aux bassins de sédimentation sont principalement micacées au sens large du mot. Ceci n'en rend que plus sensible la profonde modification que le matériel subit en cours de sédimentation et qui peut le faire aboutir à un sédiment très différent du matériel transporté (kaolinite, attapulgite).

Certains auteurs furent amenés à faire une classification générique des différents constituants des roches argileuses. En particulier CORRENS (67, 13, 69) distingue dans l'analyse de ces roches :

1° Les éléments nés au cours de l'efflorescence, de l'altération ou de la délitation. Exemple : kaolinite, montmorillonite.

2° Les minéraux qui sont des résidus d'altération. Exemple : quartz, mica.

3° Les éléments biogènes : chaux, matière organique.

4° Les éléments de néoformation dans le sédiment (pyrite, glauconie).

On fut amené, alors, quand fut connue la nature des minéraux argileux bâtis sur le type mica, à réunir ceux-ci au groupe des résidus d'altération avec le quartz et le mica détritique.

On trouve encore une telle opinion dans une partie de la littérature actuelle (390). Sans diminuer l'importance déjà soulignée des particules micacées « héritées » par le sédiment et par conséquent d'origine allogène, il apparaît probable que l'illite, comme son isotype la glauconie, peut se former en cours de sédimentation. Une telle néoformation a été démontrée par VOLK (385) dans les sols ayant reçu des engrais potassiques. La néoformation du réseau micacé est connue de tous les pétrographes dans l'altération des silicates et en particulier des feldspaths sous forme de séricite dans les conditions de l'hydrosphère. BRAJNIKOV (39, 40, 41) a décrit le sort d'une telle néoformation dans les limons.

Les expériences de transformation des minéraux argileux les uns dans les autres montrent que le passage de la montmorillonite (CAILLÈRE, MERIAUX et HENIN - 55) à une phyllite à 10 A° est possible. C'est à un tel mécanisme d'ailleurs que DIETZ (94) attribue l'abondance de l'illite dans les sédiments marins. Il n'y a donc aucune impossibilité théorique à une telle néoformation dans les sédiments. J'ajouterai qu'on ne comprendrait pas que les dépôts lagunaires sursalés soient composés de 100 % de minéraux micacés si ce milieu en particulier n'avait la possibilité d'en assurer la néoformation. Il est impossible d'imaginer en effet que les apports fluviatiles qui doivent arriver dans un bassin lagunaire prennent d'avance leur allure caractéristique.

Une distinction précise doit donc être faite entre deux constituants des roches sédimentaires.

1° Le mica détritique qui est connu de tous les géologues et qui accompagne si souvent le quartz. Il est généralement visible à l'œil nu et le flottage qu'il subit lui impose une taille triple des grains de quartz qui lui sont associés.

2° Les minéraux argileux bâtis sur le type mica où l'illite occupe le premier rang. Ces phyllites peuvent évidemment être

un produit allogène, mais il n'y a aucun doute qu'elles peuvent être aussi authigènes.

On doit de plus admettre une coupure dans les tailles. Sans préciser beaucoup on peut dire que le mica des roches sédimentaires est de l'ordre du millimètre et l'illite ou les minéraux voisins des phyllites de l'ordre du μ .

En résumé, la phase argileuse contenue dans les sédiments n'est pas uniquement détritique, clastique, mécanique ou allogène puisqu'elle varie avec les milieux où elle s'est formée. Elle est au moins en partie authigène.

On est amené aujourd'hui à une affirmation du genre de celle-ci : *d'une manière générale la sédimentation argileuse est authigène par remaniement d'un matériel en grande partie allogène.*

II. Le pH est-il responsable des variations de la phase argileuse dans les milieux de sédimentation.

Le rôle du pH dans la genèse des minéraux argileux a été mis en évidence par de nombreux chercheurs s'occupant de pédologie ou de métallogénie aussi bien que de pétrographie. Il est complètement artificiel d'isoler de la bibliographie les travaux des seuls spécialistes des études sur les sédiments car ils furent toujours fortement influencés par ceux des autres savants. Ces derniers seront passés en revue dans leurs étapes principales au paragraphe suivant. On se borne ici aux travaux des seuls pétrographes s'occupant des sédiments pour mettre en évidence le point où ils sont parvenus.

La première vue sur le rôle de la réaction des eaux vis-à-vis de la sédimentation est, à ma connaissance, de THIEBAUT qui écrit, en 1925, que « les argiles réfractaires à peu près pures n'apparaissent que dans les sédiments d'eau douce » (362 : page 159); le mot « réfractaire » désigne évidemment les argiles kaoliniques. A sa suite, DREYFUS en 1934 (97), opposa les sédiments nés dans les eaux acides aux sédiments nés dans les eaux basiques. Puis on parvint aux travaux contemporains où ROSS (341) tenant compte du pH attache plus d'importance à la présence des cations et où RIVIERE (330) attribue les roches kaoliniques aux milieux de sédimentation acides tandis que les illites ou Bravaisites seraient « le produit de l'altération banale des roches silicatées dans les conditions ordinaires de pH ».

Les études analytiques et statistiques faites dans ce travail permettent de préciser la question. En particulier, les études sur le pH des roches ont montré :

- 1° que le pH actuel des sédiments est du même ordre de grandeur que celui du milieu où ils sont nés;
- 2° que les roches acides nées en milieu acide sont constituées en majeure partie par la Kaolinite;
- 3° que les roches basiques nées en milieu basique sont constituées en majeure partie par des minéraux micacés : Illite, Glauconie, Hydrobiotite, Montmorillonite, Chlorite, ou des minéraux peu différents au point de vue cristallographique, Attapulgate, Sépiolite.

De ces coïncidences, il est tentant de tirer une interprétation causale. On peut dire que les deux phénomènes sont liés, et que l'un

est la cause de l'autre. On peut dire, par exemple, que la réaction acide ou alcaline du milieu règle la nature de la phase argileuse. Ceci est en partie exact et ramène aux travaux qui viennent d'être cités. Mais ceci paraît aujourd'hui insuffisant. En effet, plusieurs raisons permettent de penser que la variation du pH d'un milieu et la variation de la nature du minéral argileux qu'on y trouve sont toutes deux les conséquences d'une cause plus générale :

1° D'abord, comme le souligne ROSS (341), il existe parfois des milieux où la Kaolinite prend naissance, bien que le pH ne soit pas acide mais neutre, tandis qu'un lessivage efficace arrache les cations. Quand ce lessivage des cations est terminé l'acidité apparaît et croît.

2° La comparaison qui a été faite ici entre le pH des roches d'origine lagunaire et celui des roches d'origine marine, ne fait pas ressortir de différences nettes. Au contraire, la comparaison des phases argileuses révèle une différence notable. Je n'ai pas trouvé de renseignements sur le pH des eaux lagunaires actuelles, sauf une indication de LEGENDRE (231) citant LABBE qui a mesuré les pH des eaux des marais salants du Croizic et de Batz. Suivant les lieux ce pH varie de 8 à 9,2 mais là où le sel se dépose il est encore de 8,4.

On pouvait imaginer que les eaux lagunaires sont plus basiques que les eaux marines mais ce n'est pas certain, car la dissociation des sels d'acides forts et de bases fortes qui caractérisent les milieux lagunaires donne des solutions à peu près neutres. C'est donc de la dissociation des sels d'acides faibles et de bases fortes qu'on doit attendre une altération du pH et il n'est pas du tout certain que l'équilibre des carbonates par exemple soit toujours différent dans les lagunes et dans la mer.

Quoi qu'il en soit, la notion de pH, si caractéristique qu'elle paraisse d'un milieu, n'en est jamais qu'une manifestation, puisqu'elle exprime sa concentration en ions hydrogène. Celle-ci n'est elle-même qu'une conséquence des équilibres physicochimiques du milieu et l'on sait bien que tous les milieux qui ont le même pH ne sont pas identiques. Si intéressante que soit la notion de pH, elle ne caractérise donc un milieu que *partiellement* et son rôle ne peut être que *partiel* dans un phénomène comme celui de la sédimentation.

Or, aux yeux d'un enfant, la différence entre l'eau douce et l'eau de mer n'est pas que l'eau de mer est plus ou moins basique, mais qu'elle est salée. Celle du marais salant est sursalée. Au cours de la revue qui a été faite dans ce travail on a vu que les roches marines ou lagunaires sont très souvent calcaires tandis que les roches nées dans des eaux agressives ne le sont jamais. C'est donc dans les équilibres physicochimiques du milieu où interviennent la rapidité de la circulation des eaux, les sels minéraux et les gaz dis-

sous, les matières organiques et les fermentations bactériennes, qu'il faut rechercher la causalité des phénomènes en discussion ici. Le pH ne sera lui-même qu'une conséquence, à la vérité importante, de ces équilibres, dont le mécanisme peut aujourd'hui être entrevu sous plusieurs de ses aspects.

III. Revue de quelques travaux sur l'influence du milieu sur la genèse des minéraux argileux.

De nombreux travaux ont été faits dans diverses disciplines pour mettre en évidence l'influence du milieu sur la genèse des minéraux argileux. Ces travaux seront étudiés dans l'ordre suivant :

Etudes sur les roches sédimentaires.

Etudes sur les limons qui sont des formations superficielles récentes.

Etudes sur les sols.

Essais de synthèse à haute température.

Etudes sur les gîtes hydrothermaux.

Etudes chimiques sur la silice et l'alumine.

A) ÉTUDES SUR LES SÉDIMENTS.

Parmi les géologues s'intéressant aux sédiments, seuls J. DE LAPPARENT et ROSS semblent avoir abordé le problème de la genèse des minéraux argileux en soulignant l'influence des électrolytes du milieu. J. DE LAPPARENT avait insisté sur le rôle des sels dans certains milieux de sédimentation. Pour lui les matériaux issus de la décomposition des micas et des feldspaths sont entraînés vers un milieu salin dans lequel ils vont se sédimenter. Ainsi se constitueront ce que cet auteur appelle des « *mixtes silico-alumineux magnésiens et plus ou moins calciques* » qui évolueront en silicates cristallisés. La magnésie et la chaux du milieu viendraient s'incorporer au « *mixte silico-alumineux* » et l'Attapulgit se formerait. Et Jacques DE LAPPARENT ajoute que les sédiments à Attapulgit sont d'autant plus riches en cette espèce et d'autant plus abondants dans une série sédimentaire que celle-ci est profondément marquée par le caractère désertique où des saumures se

forment dans les bassins de sédimentation (212). Si l'on sait que, sous le terme d'Attapulgit, J. DE LAPPARENT englobait ce que nous nommons aujourd'hui l'illite, on voit la perspicacité de cette vue ancienne de plus de douze ans. D'autre part, ce même auteur a insisté le premier sur le milieu « hydromagnésien » nécessaire à la formation de la Montmorillonite (208, 210, 217).

ROSS en 1942 (341) a exposé les affinités géologiques des minéraux argileux. Il a souligné que, nées en milieu acide ou en milieu fortement lessivé, les roches kaoliniques se formaient là où les bases sont éliminées. La Montmorillonite nécessiterait au contraire la présence de bases où MgO jouerait un rôle essentiel. Les minéraux du type mica hydraté, fréquents dans la mer, y fixeraient le potassium imposé par leur composition chimique.

B) ÉTUDE SUR LES LIMONS.

BRAJNIKOV, en 1937 (39, 40, 41), a étudié l'argile à silex du Bassin de Paris puis les limons. Il y a découvert un élément argileux caractéristique qu'il a nommé minéral E. Il assura sa détermination par les techniques de cette époque. L'interprétation de ses tableaux de chiffres ainsi qu'un spectre du minéral E fait par RIVIERE plus tard (330) indique qu'on doit se trouver devant un mélange tel que ceux que l'on a trouvés ici couramment, mélange d'illite, de Kaolinite et de mica hydraté. J'ai retrouvé un tel mélange d'ailleurs dans une argile ocre contenue dans une poche superficielle du plateau bajocien de Haye à Maxéville (M.-et-M.) (figure 9, courbe II). Cette argile est tout à fait analogue au point de vue génétique aux argiles à silex de BRAJNIKOV. Cet auteur a décrit ce minéral par la locution de « complexe évoluant » dont le milieu de formation serait caractérisé par les substances qui proviennent de la dissolution de la craie et en particulier CO_3Ca et $(\text{CO}_3\text{H})_2\text{Ca}$.

De plus ce milieu de formation serait aussi le milieu nécessaire à la stabilité du « complexe ». Quand tout le carbonate est dissous et le Ca lessivé, quand les ions Mg et Ca sont « désorbés » par le lessivage, quand le milieu n'est plus alcalin, le minéral E se détruit et disparaît. L'ensemble de ces recherches, qui sont applicables au milieu de sédimentation des roches, est l'un des pas en avant les plus considérables qui furent faits vers l'explication de l'évolution de tout ce que l'on appelle argile. De plus ces travaux suggèrent une première fois que les conditions de genèse d'un minéral ou d'un mélange de minéraux argileux sont aussi celles de la stabilité de ces minéraux.

C) ÉTUDE DES SOLS.

La plupart des sols contiennent des mélanges de minéraux argileux. KELLEY (192) dans une revue récente des acquisitions sur la répartition des minéraux argileux dans les sols, a montré la confusion qui règne encore dans ce domaine. Ici jouent de nombreux facteurs : la roche mère et l'évolution antérieure du sol, qui font « hériter » (EDELMAN, 101) celui-ci de minéraux préexistants, le climat, la végétation bactérienne ou autre, le régime des circulations, etc... Néanmoins on peut citer dans une vaste bibliographie quelques faits particulièrement suggestifs où l'action du milieu, dans lequel les minéraux argileux prennent naissance, est particulièrement nette.

Aux Indes néerlandaises, HARDON et FAVERJEE (163) ont décrit les sols des flancs des volcans de Java. Les pentes du volcan sont formées de terres latéritiques; elles sont acides et contiennent de la Kaolinite. Dans la plaine, au contraire, se trouvent des terres calcaires, alcalines, à Montmorillonite.

En Australie, HOSKING (179) a montré qu'à partir d'une roche cristalline basique, il s'était formé un sol kaolinique dans des conditions de pluies fréquentes et de drainage efficace tandis qu'un sol montmorillonitique apparaissait là où les pluies étaient faibles et le drainage mal assuré.

Aux Indes, NAGELSCHMIDT, DESAI et MUIR (301) décrivent, dans une même région, sous le même climat et à partir de roches semblables, deux types de sols; un sol kaolinique de pH 6,1 à 7,4 sur les pentes où le drainage est bon, un sol montmorillonitique de pH 8 à 8,4 dans les plaines où le drainage est faible.

Partant de considérations de ce genre ainsi que de considérations cristallographiques, EDELMAN (101) a construit les courbes de titration de la Kaolinite et de la Montmorillonite. Le point d'inflexion de la courbe de la Kaolinite, qui réagit avec les acides comme avec les bases, se situe entre pH 4 et pH 5. C'est à ce point que se trouve le minimum des possibilités de réaction avec le milieu, donc c'est à ce point que correspondent les conditions de stabilité et probablement aussi les conditions de genèse. La courbe de titration de la Montmorillonite présente deux points d'inflexion. Le principal se trouve vers pH 8 et ce point serait celui du maximum de stabilité, donc le point le plus favorable à la naissance du minéral.

On voit se dessiner le schéma selon lequel la présence des ions dans le milieu, fixe les conditions où un minéral plutôt qu'un autre se formerait. Le milieu de formation correspondrait au milieu où le minéral est le plus stable et le pH serait une manifestation importante de ce milieu.

D) ESSAIS DE SYNTHÈSE DES MINÉRAUX ARGILEUX AU LABORATOIRE.

La synthèse des minéraux argileux au laboratoire a été tentée de deux manières. D'abord à froid, c'est-à-dire dans les conditions de l'hydrosphère (CAILLERE et HENIN, 52, 54; LONGUET, 247) mais par des mécanismes encore assez différents de ceux que l'on peut imaginer se réaliser dans le milieu naturel. D'autres synthèses ont été réalisées à chaud, dans des conditions voisines de celles qu'on attribue au milieu hydrothermal. Une revue complète de ces recherches (arrêtée en 1939) a été faite par MOREY et INGERSON (294). Le produit de départ est, soit un mélange de silice ou d'alumine en présence ou non de divers cations, soit un minéral naturel : dans ce dernier cas on parle d'altération hydrothermale.

Les travaux les plus récents sont ceux de NOLL (312, 313, 314) et de NORTON (315). Les résultats de NOLL sont obtenus à partir de mélanges de silice, d'alumine et de divers cations. La Kaolinite a été obtenue en solution neutre exempte d'alcalin ou en solution acide renfermant un alcalin en dessous de 400°. La Montmorillonite se forme en présence d'une quantité modérée d'alcalin ou d'alcalinoterreux en solution alcaline mais plus facilement en présence de Mg. La Séricite se forme en solution alcaline pour une concentration en K_2O plus forte que pour la Montmorillonite et à peu près égale à la quantité nécessaire pour réaliser la formule de la Muscovite. Ces résultats se sont produits quelle que soit la proportion d'alumine ou de silice dans le milieu. Ceci montre qu'à température élevée (300 à 400°) les cations dirigent les phénomènes.

NORTON part des minéraux tels que Albite, Anorthite, Orthose, Néphéline, Leucite, Pétalite (Li_2O , Al_2O_3 , $3SiO_2$) et Spodumène (Li_2O , Al_2O_3 , $4SiO_2$). Il fait agir d'une manière variable le gaz carbonique ainsi que la pression et la température. Parmi de nombreux résultats, on peut saisir les suivants : Albite et Anorthite donnent la Montmorillonite; Orthose, Néphéline et Leucite donnent la Séricite; enfin, Pétalite et Spodumène donnent la Kaolinite. NORTON conclut que dans les conditions particulières où il a travaillé, le produit final est déterminé par les cations ainsi que par la structure du minéral d'origine.

E) RECHERCHES SUR LES GITES HYDROTHERMAUX.

Au voisinage de gîtes hydrothermaux, les roches ont souvent subi en outre une altération qui peut être la formation de Kaolin ou de Séricite. Sur le problème des gîtes de Kaolin une controverse séculaire partage les savants entre deux hypothèses : l'une qui attribue les gîtes de Kaolin à la percolation des eaux superficielles acides,

l'autre à l'action des eaux thermales profondes. De nombreuses observations précises militent alternativement pour l'une et l'autre de ces interprétations, si bien qu'on est fondé à dire que les gîtes sont d'une catégorie ou de l'autre suivant les cas. Cependant, que l'on s'adresse à L. DE LAUNAY (221), à RAGUIN (325), ou à LINDGREN (238), on voit que les spécialistes attribuent la majeure partie des gîtes de Kaolins à des eaux superficielles acides (CO_2 , SO_3 , etc.) atteignant certains massifs ou se poursuivant en profondeur le long de diaclases ou des filons métallifères. On se trouve dans ce cas dans un mode de formation qui mérite au premier chef d'être qualifié de « lessivage ». Le milieu est lavé de tous les cations et en présence de radicaux acides, la Kaolinite se forme. Les Kaolinites d'origine hydrothermale existent aussi mais les mécanismes sont plus obscurs. De toutes manières, les spécialistes parlent d'eaux acides, qu'il s'agisse de gîtes nés per ascensum ou per descensum (LOVERING, 248, 248 bis).

Le phénomène de la séricitisation, auquel, sans doute, on peut joindre celui de la chloritisation ou propylitisation, est fort différent. Dans l'ensemble, on s'accorde pour penser qu'il est dû à l'action des eaux hydrothermales alcalines.

Fréquemment la kaolinisation superficielle se produit sur un matériel antérieurement séricitisé par des venues profondes, d'où la complexité des interprétations causales sur les deux phénomènes.

F) ÉTUDE CHIMIQUE DU COMPORTEMENT DE SiO_2 ET Al_2O_3 DANS L'EAU.

Une première série de données (CORRENS, 13) indique les variations de la solubilité de la silice et de l'alumine à l'état cristalloïde. Si le pH est inférieur à 4, SiO_2 est très insoluble et Al_2O_3 très soluble. Si le pH est intermédiaire entre 5 et 9, Al_2O_3 est très peu soluble et SiO_2 de plus en plus soluble. Si le pH est supérieur à 9, les deux anions sont solubles. L'application au problème de la genèse des minéraux argileux est la suivante. Si les complexes argileux naissent à partir de solutions vraies, on voit que si ces dernières sont au pH 4, elles sont pauvres en silice et doivent donner des néoformations relativement pauvres en silice (Kaolinite). Si les solutions sont au pH 8, elles sont relativement plus riches en silice et donnent des néoformations riches en silice (Montmorillonite, Illite par exemple) et c'est bien ce qu'on observe dans la nature. De même on voit que dans des conditions voisines de la neutralité, un grand lessivage abaisse plus vite la teneur du milieu en silice qu'en alumine.

Une deuxième série de données (CORRENS, 13) indique les variations de la stabilité des sols ou solutions colloïdaux de silice et d'alumine colloïdaux dans l'eau. Le sol de SiO_2 est très stable, car hydrophile et il faut une grande quantité d'électrolyte pour le faire flocculer. Le sol de l'alumine est hydrophobe et instable et floccule pour une petite proportion d'électrolyte.

Ces faits sont extrêmement importants. En effet, parmi les électrolytes, les cations polyvalents, qui ont une grande affinité pour l'eau sont plus flocculants que les monovalents. Les plus communs qui sont le calcium et le magnésium vont donc avoir une action énergique sur les sols hydrophobes d'alumine. Celle-ci flocculera et sera éliminée du milieu. On voit apparaître ici le rôle qualitatif des cations et non plus seulement leur commune réaction basique exprimée par le pH, quand ils sont en solution dans l'eau. Pratiquement un milieu riche en cations flocculants (Ca, Mg) sera pauvre en alumine dispersée et proportionnellement plus riche en silice. La néoformation en équilibre avec ce milieu sera siliceuse (réseau micacé). Inversement si le milieu est pauvre en cations, l'alumine sera stable et les néoformations alumineuses (Kaolinite).

Une troisième série de données (MATTSON, 269 et 270; DEMOLON et BASTISSE, 84) montre la variation du rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans un flocculat obtenu par mélange de solutions contenant ces deux ions. On voit que

1° Le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans le flocculat obtenu au point isoélectrique augmente avec le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans le mélange des deux solutions initiales.

2° Le pH au point isoélectrique diminue quand $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ augmente dans le flocculat et dans la solution initiale.

3° La présence d'anions diminue le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans le flocculat au point isoélectrique.

4° La présence de cations augmente le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans le flocculat. Les ions Ca et Mg sont surtout actifs.

Si, comme le propose MATTSON, les complexes argileux dans les sols naturels sont le produit de la précipitation mutuelle de sols électropositifs (ex. alumine, hydrate ferrique) et de sols électronégatifs (silice, acides humiques) à partir de solutions, ses expériences montrent l'influence sur la genèse des minéraux argileux du rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$

— dans la solution, puis de la présence des anions et de la présence des cations. Par contre les valeurs décroissantes du pH au point isoélectrique, quand le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ augmente, ne sont pas encore interprétées et semblent en contradiction avec les phénomènes naturels ou expérimentaux qui ont été examinés.

EDELMAN pourtant remarque les faits suivants : le point d'inflexion de la courbe de titration de la Kaolinite se fait au pH 4.

Le pH au point isoélectrique du flocculat dont le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3} = 2$ est aussi aux environs de 4. Les deux chiffres coïncident. Par contre, pour la Montmorillonite, les deux chiffres correspondants ne coïncident pas. Ceci ne paraît pas explicable à l'heure actuelle.

RÉSUMÉ SUR L'ENSEMBLE DE CES TRAVAUX.

L'ensemble de ces travaux poursuivis par des savants de disciplines différentes et dans des buts différents permet de dresser le bilan suivant, où les accords sont beaucoup plus nombreux que les notes discordantes.

1° Une grande importance est accordée à la présence ou à l'absence de cations dans la majorité de ces travaux (J. DE LAPPARENT, ROSS, BRAJNIKOV, NOLL, NORTON, MATTSON, etc...).

2° La nature des cations semble jouer un rôle pour certains (J. DE LAPPARENT, ROSS, BRAJNIKOV, NOLL, NORTON, MATTSON), et être indifférente pour d'autres.

3° Le rôle des anions en eux-mêmes est difficile à préciser car il se confond avec le rôle de l'acidité. Cependant on voit celui-ci souligné par ROSS, MATTSON, et les spécialistes des gîtes hydrothermaux.

4° Le rôle du pH est unanimement reconnu.

5° Le rôle du rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ dans le produit d'origine est consi-

déré comme nul par un grand nombre. Par contre, il serait très important dans les solutions nourricières (EDELMAN, CORRENS, MATTSON). HENIN a souligné ce point (131).

6° L'intensité du lessivage est considérée comme un facteur important par ROSS, BRAJNIKOV, NAGELSCHMIDT, EDELMAN, CORRENS.

L'influence de tous ces facteurs, soulignés par les uns ou par les autres dans divers domaines, semble jouer aussi un rôle dans la *génèse des minéraux argileux dans les roches sédimentaires*. C'est ce que je montrerai dans le chapitre suivant.

IV. Essai sur la genèse des minéraux argileux dans les roches sédimentaires.

Les faits accumulés dans ce travail, les lois statistiques qui en sont tirées ainsi que la compilation des travaux faits dans diverses disciplines pour éclairer les conditions de genèse des minéraux argileux m'ont incité à proposer l'essai suivant sur la *génèse de ces minéraux dans les roches sédimentaires*.

Parmi les multiples facteurs qui règlent les équilibres physico-chimiques d'un milieu de sédimentation, les uns plus apparents que d'autres paraissent jouer un rôle dans la genèse des phyllites argileux. Je passerai ces différents facteurs en revue. Aucun d'eux n'est indépendant. Si l'on veut indiquer comment chacun d'entre eux influe sur les autres, on est amené à de nombreuses répétitions. Je tâcherai de les limiter, mais elles montrent à quel point le milieu de sédimentation est un tout et que si l'un des facteurs varie, de nombreuses variations se déclenchent entraînant une variation des produits sédimentés.

Les principaux facteurs qui influent sur la nature de la phase argileuse dans un sédiment sont les suivants :

1° PRÉSENCE OU ABSENCE DES CATIONS.

La présence des cations libres dans le milieu revient à la présence de sels minéraux capables de se dissocier. Au premier rang de ceux-ci viennent les sels d'acides faibles et principalement les carbonates et les bicarbonates. Les cations influent, pour une part, sur le pH du milieu et l'on sait que celui-ci règle les solubilités de la silice et de l'alumine dans les solutions.

En conséquence, un milieu riche en cations libres sédimentera des minéraux riches en silice comme les minéraux phylliteux à trois couches bâtis sur le type mica. Au contraire, un milieu pauvre en cations favorisera la genèse de phyllites pauvres en silice tels que la Kaolinite.

2° LA NATURE DES CATIONS QUAND ILS SONT PRÉSENTS.

L'ensemble des recherches actuelles permet de dire que la nature des cations est un facteur important dans la genèse des minéraux argileux. Ils peuvent agir de deux manières :

1) Le rôle de la nature des cations présents dans le milieu de sédimentation, sur les minéraux néoformés, est évident pour ceux qui entrent dans la composition chimique et l'édifice cristallin des minéraux eux-mêmes. Ceci est le cas, en particulier, pour le K dans l'illite, pour le Mg dans la Montmorillonite et l'Attapulgit, pour le fer ferrique dans la Glauconie.

2) Par contre, beaucoup moins évident et semble-t-il très important, est le rôle de certains cations sur la néoformation de minéraux, dans la structure desquels ils n'entrent pas. Ceci est, au premier chef, le cas du Calcium, suivi fréquemment du Mg, c'est-à-dire des cations divalents. Ainsi tout un ensemble de faits déjà examinés montrent que la présence de cations bivalents dans un milieu favorise la formation des minéraux micacés et bloque la genèse de la Kaolinite. On en verra plus loin encore un très bel exemple dans le phénomène de l'altération des silicates. On a déjà montré le mécanisme possible de cette action qualitative des cations. Les cations divalents, et en particulier Ca et Mg, si fréquents dans les milieux naturels, sont flocculants pour les colloïdes hydrophobes, comme l'Alumine. Chassée du milieu, celle-ci est éliminée en partie de la néoformation silicatée, d'où l'apparition du réseau micacé.

3° LA PRÉSENCE OU L'ABSENCE D'ANIONS ET LEUR NATURE

forment un ensemble de facteurs dont le rôle est mal élucidé mais qui joue sûrement dans la genèse des minéraux phylliteux. On ne peut que souligner le rôle des anions CO_2 , CO_3H , SH_2 , SO_3 , P_2O_5 , $\text{B}_2\text{O}_3\text{H}_2$ et des acides humiques. On voit tout de suite que ces anions influent sur le pH, entrent en combinaisons solubles ou insolubles avec les bases, et forment avec ces dernières des sels dissociables ou non. Par tous ces mécanismes, les anions participent directement au façonnage des néoformations en cours.

L'exemple le plus manifeste en est la genèse de la Kaolinite dans les eaux acides.

1° LE RÔLE DU pH

apparaît alors comme une conséquence des autres facteurs en équilibre; équilibre dont il mesure, d'une manière simple, une caractéristique importante. Dans la sédimentation des phyllites silico-alumineuses, on peut dire que le jeu des bases et des acides est repéré par le pH et détermine la solubilité de la silice et de l'alumine. La causalité appartient bien au jeu et à la nature des acides et des bases; le pH n'est qu'une manifestation facile à mesurer et commode à employer.

5° LA VALEUR DU RAPPORT $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ DANS LE MATÉRIEL D'ORIGINE

semble indifférente. Encore faut-il que ces deux éléments soient présents.

6° LA VALEUR DU RAPPORT $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ DANS LA SOLUTION

qui est en déséquilibre à la fois avec le matériel d'origine et avec la néoformation est capitale. J'en ai plusieurs fois souligné la conséquence sur la nature du matériel sédimenté riche en silice si ce rapport est riche, pauvre en silice, si ce rapport est faible. La valeur de ce rapport est déterminée à la fois par le pH et par la qualité des anions et des cations.

7° L'INTENSITÉ DU LESSIVAGE,

c'est-à-dire du renouvellement des solutions, est considérable. Elle régit la concentration des électrolytes, l'entraînement des sels peu solubles et par conséquent tout l'équilibre acides-bases du milieu ainsi que la qualité des ions présents. De plus elle régit la concentration des gaz dissous : non seulement celle du CO_2 , mais celle de l'oxygène qui dirige les manifestations de la vie et règle le potentiel d'oxydoréduction.

Deux exemples opposés peuvent être pris parmi ceux qui ont été rencontrés. Les dépôts fluviolacustres de piedmont lavés, lessivés, oxydés donnent des dépôts du type kaolinique et sidérolithique. Les dépôts lagunaires en d'immenses étendues immobiles se chargent en sels de toute nature et mènent à la genèse des minéraux micacés.

8° LE POTENTIEL D'OXYDO-RÉDUCTION

Le rôle du rH est certainement important. On peut le saisir par deux exemples :

a) le rH règle le degré d'oxydation du fer. Celui-ci peut être un élément accessoire des Roches Argileuses comme la limonite où le fer est ferrique et la pyrite où il est ferreux. Il peut par ailleurs être un élément constitutif des édifices cristallins néoformés comme dans la glauconie où la plus grande partie du fer est ferrique.

b) Le rH préside aux conditions de la vie. La présence d'oxygène permet le développement de la faune et de la flore tandis que les fermentations aérobies réduisent et détruisent leurs restes organiques après leur mort. Au contraire, l'absence d'oxygène empêche

la vie des macroorganismes, favorise la conservation des détritiques organiques sous forme de matières bitumineuses par exemple, et permet les fermentations anaérobies. Ces dernières, en particulier, mènent à la formation de sulfures. L'acide sulfhydrique apparaît, ainsi que le prouve l'odeur des vases, le pH baisse, les cations entrent en solution, la solubilité de la silice diminue : la Kaolinite pauvre en silice peut se former. C'est ainsi que j'interprète, pour l'instant la constitution argileuse des boues bleues marines.

Tels sont les différents facteurs dont aujourd'hui on peut saisir l'influence. Aucun de ces facteurs n'est indépendant. Ils se contrôlent et se dirigent les uns les autres et entre eux s'établit un équilibre stable au milieu duquel les minéraux argileux sont stables. Que pour une raison ou pour une autre un des facteurs soit modifié, aussitôt l'équilibre est rompu et d'innombrables modifications se produisent dans le milieu. La Phase argileuse ne peut y rester insensible. Qu'un sédiment argileux, stable depuis la date ancienne de son dépôt, soit amené par l'érosion dans la zone de circulation des eaux superficielles, l'équilibre est rompu. Une véritable évolution se produit à laquelle la phase argileuse n'échappe pas : les formations superficielles (argiles résiduelles et sols) montrent qu'elle prend une nouvelle allure. Ainsi l'on voit que les conditions de genèse des minéraux argileux sont aussi les conditions de leur stabilité.

EN CONCLUSION :

1) Dans un milieu de sédimentation où les cations sont évacués soit par un lessivage faible en milieu très acide, soit par un lessivage vigoureux en milieu neutre, la solubilité et la stabilité de SiO_2 et Al_2O_3 dans la solution est telle que la néoformation argileuse qui se fait est de type kaolinique. Ceci est le cas du milieu lacustre ou fluviolacustre acide ou fortement lessivé. Le produit est purement

SiO_2

silicoalumineux. Le rapport $\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$ est voisin de 2.

2) Dans un milieu de sédimentation où les solutions ne sont pas renouvelées, les cations sont très abondants, ce qui entraîne un pH basique; la solubilité et la stabilité de SiO_2 et Al_2O_3 dans la solution est telle que la néoformation argileuse est de type micacé. Le rapport

$\frac{\text{SiO}_2}{\text{Al}_2\text{O}_3}$

est supérieur à 3.

Des types variés peuvent survenir, en fonction des variations du milieu : Illite quand le milieu est potassique, Glauconie quand le milieu est potassique et ferrique, Montmorillonite quand le milieu

n'est pas potassique, le magnésium intervenant volontiers.

L'Attapulgite et la Sépiolite ne sont pas bâtis sur le type mica mais représentent des types cristallographiques voisins et nécessitent un milieu basique pauvre en potasse et en alumine, mais riche en silice et magnésie.

3) Dans un milieu de sédimentation intermédiaire, les différents types se mélangent.

4) Les conditions de genèse des minéraux argileux sont aussi les conditions de leur stabilité. Si, en effet, elles viennent à changer, le minéral argileux réagit avec son nouveau milieu : il évolue ou se dégrade.

V. Application de l'essai proposé aux roches argileuses étudiées.

L'essai proposé se vérifie sur les sédiments étudiés dans ce travail ainsi que le montre la revue suivante faite par catégories de roches, selon leur origine.

1° LES ROCHES MARINES.

Dans l'ensemble on a vu que les roches marines sont caractérisées par un pH alcalin, et la présence de minéraux micacés plus ou moins dominants sur la Kaolinite. Différents groupes peuvent être faits en fonction de leurs conditions de genèse.

A) Roches très calcaires.

DARNIEULLES (n° 1 Muschelkalk — Vosges) correspond à un envasement éphémère au cours d'une sédimentation calcaire liée à des prairies de Crinoïdes. Milieu très calcaire, sans doute superficiel. Le résultat est une proportion de minéraux micacés supérieure à 90 %.

LIFFOL-LE-GRAND (n° 14 Callovien — Vosges) contient 50 % de calcaire. C'est un dépôt de mer agitée superficielle. Le résultat est 70 % de minéraux micacés.

POISSONS (n° 18 Kimmeridgien — Haute-Marne) est une roche légèrement bleutée, ce qui montre une faible proportion de sulfures. Cependant ce dépôt correspond à une boue, très riche en calcaire. Le résultat est 80 % de minéraux micacés.

HEMING (n° 21 Muschelkalk — Moselle) correspond à un accident dans la sédimentation calcaire du Muschelkalk. Mais ici ce changement est plus qu'éphémère. Le dépôt est calcaire, mais la vase marine sédimentée a tout de même permis le développement d'un peu de pyrite d'ailleurs épigénisée depuis en oligiste; cependant le résultat est 90 % de minéraux micacés.

SENONCHES (n° 22 Turonien — Eure-et-Loir) correspond à la sédimentation de la craie. Il y a là un dépôt d'une boue extrêmement calcaire où la phase argileuse est très peu abondante. Elle apparaît constituée de Montmorillonite à peu près pure : soit 100 % de minéraux micacés.

B) Roches riches en pyrite.

a) *peu calcaires*. En opposition complète avec les précédentes sont les marnes bleues si caractéristiques des séries marines. Elles

sont pauvres en calcaires et riches en pyrite; exemples : GERARD-COURT (n° 6 Sinémurien — M.-et-M.), NANCY (n° 7 Charmouthien — M.-et-M.), JEANDELAINCOURT (n° 8 Charmouthien — M.-et-M.), Schiste carton (n° 10 Toarcien — M.-et-M.), CHAMPIGNEULLES (n° 11 Toarcien — M.-et-M.) et MOESLAINS (n° 21 Albien — Haute-Marne).

Ces marnes contiennent moins de 10 % de calcaire sauf une (Schiste carton 15 %). Elles sont bleues ou noires. Le lavage indique toujours des cristallisations de pyrite, même quand les fossiles ne sont pas pyriteux. On a là sans doute l'équivalent des vases bleues sulfureuses connues dans les mers actuelles. Sous une mince pellicule encore oxygénée, le milieu est réducteur et les fermentations anaérobies se produisent. Le pH baisse, les cations entrent plus volontiers en solution. La teneur en gaz carbonique diminue. La Kaolinite survient et rivalise dans les cas les plus extrêmes avec les minéraux micacés. Dans l'ensemble, la proportion des minéraux micacés est ici de 50 à 60 %. Le pH actuel des roches est le plus bas qu'on ait trouvé pour les milieux marins et lagunaires : il peut descendre à pH 7,2.

b) *assez calcaires*. Certaines roches sont semblables aux précédentes mais la proportion de calcaire augmente, entraînant un éclaircissement de leur couleur. La pyrite reste abondante dans les produits de lavage. Il s'agit de XEUILLEY (n° 4 Sinémurien — M.-et-M.), ECROUVES (n° 16 Oxfordien — M.-et-M.), LA SEIGNE (n° 15 Callovien — Doubs). Les fossiles sont pyriteux dans les deux dernières. Les conditions sont donc voisines de celles qui précèdent, mais, dans ces boues sulfureuses, le carbonate intervient plus vigoureusement. Le résultat est une teneur en minéraux micacés comprise entre 60 et 70 %, cette proportion est un peu supérieure à la précédente.

c) *très calcaires, associées aux précédentes*. Dans plusieurs des gisements des marnes précédentes, on voit qu'elles alternent avec des bancs plus riches en calcaires. Cet aspect est bien connu des stratigraphes dans un grand nombre de séries marines où les marnes bleues marines alternent régulièrement avec des bancs calcaires qui sont massifs ou formés de « miches de pain » alignées. Ceci est le cas des nodules ou bancs calcaires de XEUILLEY (n° 5 Sinémurien — M.-et-M.), JEANDELAINCOURT (n° 9 Charmouthien — M.-et-M.), CHAMPIGNEULLES (n° 13 Toarcien — M.-et-M.), ECROUVES (n° 17 Oxfordien — M.-et-M.). On a l'impression que la proportion de minéraux micacés est un peu plus forte que dans les marnes franches qui leur sont associées, en particulier, pour les échantillons n° 5, n° 9 et n° 17. Pour Champigneulles n° 13, le phé-

nomène n'est pas net. De plus, on a déjà vu page 140 et page 162 que la composition chimique des phases argileuses extraites des échantillons n° 5 et n° 17 montre une teneur en magnésie et en potasse plus grande que celle de bancs marneux. Ainsi l'augmentation de la teneur en minéraux micacés serait vérifiée, mais il faudra de plus nombreux exemples pour acquérir une certitude.

C) *Roches ni très calcaires ni très pyriteuses.*

GIRONCOURT (n° 3 Rhétien — Vosges) n'est ni calcaire ni pyriteuse. Elle représenterait assez bien certains types de vases actuelles, non calcaires. La phase argileuse est un mélange de 70 % de minéraux micacés et de 30 % de Kaolinite.

LOUVEMONT (n° 19 Aptien — Haute-Marne) n'est pas calcaire; elle est très riche en limonite, mais certains indices et la présence de gypse permettent de songer que c'est peut-être une vase légèrement pyriteuse évoluée. Le résultat est 60 % de minéraux micacés...

LUDRES (n° 11 Toarcien — M.-et-M.) est assez calcaire. On n'y trouve pas de pyrite. La phase argileuse contient 60 % de minéraux micacés.

Ces trois échantillons sont difficiles à interpréter. Les conditions de genèse sont mal définies. Néanmoins, on peut remarquer qu'ils sont très semblables par leur phase argileuse aux vases précitées. De plus nombreux documents doivent permettre un jour de leur trouver une place dans une classification génétique.

D) *Cas de Crévic (Rhétien) n° 3 bis.*

On a vu page 135 que le milieu de genèse de cet échantillon n'est pas défini. Le stratigraphe ne disposant d'aucun fossile peut hésiter entre un milieu marin et lagunaire, ce dernier étant envisagé à cause de la couleur rouge de la roche. L'analyse de la phase argileuse montre 50 % de Kaolinite dans le mélange. Or, cette proportion n'a été rencontrée dans aucune des formations lagunaires étudiées. On peut en déduire que le milieu de genèse des Marnes de LEVALLOIS n'était pas sursaturé en sels. Le spectre est semblable à celui des vases marines les plus typiques : ceci n'est pas une raison suffisante pour en déduire le milieu de genèse mais indique que malgré une forte proportion de CO_3Ca dans la roche, celle-ci n'a aucun caractère reconnu jusqu'à maintenant dans les Roches lagunaires. On peut ajouter qu'aucune trace de sels figurés n'y a jamais été décrite et que la phase carbonatée de cette roche n'est pas magnésienne, au contraire de celle de nombreuses roches du Keuper supérieur.

E) *Roches glauconieuses.*

Un seul niveau à Glauconie a été étudié dans ce travail : le grès

vert de l'Albien inférieur de Haute-Marne. On l'a étudié surtout à titre de témoin en raison de la parenté de cette espèce minérale avec l'Illite. Connue bien avant cette dernière, la Glauconie est un minéral argileux qui fait partie du groupe des minéraux micacés et dont l'espacement basal est de 10 Å° comme celui de l'Illite, ainsi qu'on l'a vu plus haut (page 42). Je n'en parlerai ici que pour mettre en place dans un essai de synthèse sur la genèse des minéraux argileux ce qu'on sait sur celle de ce minéral.

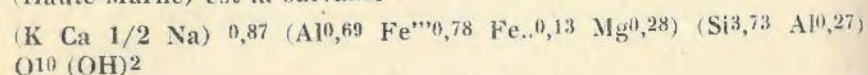
Le travail le plus récent sur la genèse de la glauconie est celui de HENDRICKS et ROSS (175). Une revue bibliographique importante y est faite qui comprend les travaux de langue française de CAYEUX et COLLET. Pour l'unanimité des auteurs, le milieu de genèse est marin. Je n'ai vu nulle part parler de son occurrence dans le milieu lagunaire. Pourtant j'ai rencontré la glauconie dans les marnes de PECHELBRONN (n° 39), mais ceci peut s'expliquer par une convergence accidentelle. J'ai rencontré aussi la glauconie dans les marnes de DAMELEVIERES (Lettenkohle M.-et-M. n° 30), mais celles-ci sont sujettes à des incursions marines. Je n'ai pas remarqué jusqu'à maintenant de glauconie dans les faciès lagunaires francs.

Pour ce qui est des conditions de sédimentation, la majorité des auteurs parle de caractère littoral ou sublittoral, de faible profondeur et d'eaux agitées. Sur le potentiel d'oxydo-réduction, il y a désaccord entre les auteurs : TWENHOFEL (367) parle d'un milieu intermédiaire entre des conditions fortement réductrices et fortement oxydantes. J'ai déjà dit qu'il semblait que la roche s'était formée en deux temps. Un temps oxydant où du fer ferrique entre en combinaison silicatée et donne la glauconie dans un milieu convenable, un temps réducteur après sédimentation où des fermentations anaérobies peuvent permettre la production de la pyrite si fréquemment associée à la glauconie. Des études ultérieures sur le grès vert doivent préciser ces points.

Il n'est pas sans intérêt de remarquer que la glauconie, essentiellement marine, possède la même structure que l'Illite dont la formation est si favorisée par les milieux riches en cations donc basiques. Plus généralement on voit que la glauconie, en se confinant dans le milieu marin, a des conditions de genèse qui doivent avoir des points communs avec les minéraux micacés qui naissent en milieu basique.

Enfin HENDRICKS et ROSS (175) ont calculé 52 formules chimiques de glauconie. Ils en tirent la formule moyenne suivante : $(\text{K Ca } 1/2 \text{ Na})_{0,84} (\text{Al}_{0,47} \text{ Fe}^{+0,97} \text{ Fe}^{+0,19} \text{ Mg}_{0,40}) (\text{Si}_{3,65} \text{ Al}_{0,35}) \text{O}_{10}(\text{OH})_2$

La formule de HUTTON et SEELYE (182) est analogue. La formule de la glauconie du grès vert de l'Albien de Moeslains n° 20 (Haute-Marne) est la suivante :

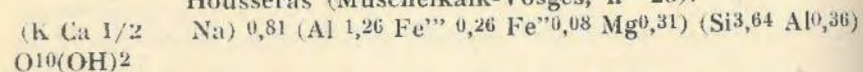


Toutes ces formules sont comparables.

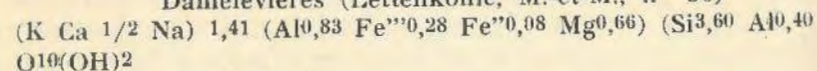
On peut leur comparer, alors, les formules d'Illite que j'ai pu calculer dans ce travail sur des phases argileuses ne contenant à peu près rigoureusement que ce minéral.

Ces formules sont :

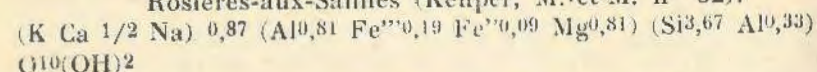
Housseras (Muschelkalk-Vosges, n° 28).



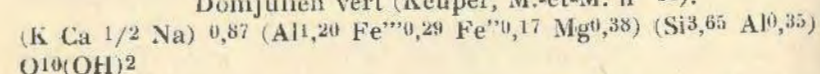
Damelevières (Lettenkohle, M.-et-M., n° 30)



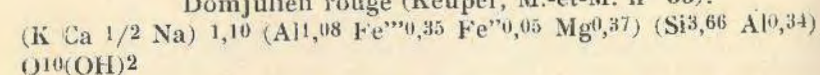
Rosières-aux-Salines (Keuper, M.-et-M., n° 32).



Domjulien vert (Keuper, M.-et-M., n° 34).



Domjulien rouge (Keuper, M.-et-M., n° 33).



Il est inutile de souligner la grande parenté de ces formules. La glauconie peut se déduire de l'illite par un remplacement isomorphe de l'aluminium par le fer ferrique. Les autres termes de ces formules sont remplacés. On peut noter la constance du silicium. La proportion habituelle de magnésie qui est voisine de 0,30 à 0,40 est seulement dépassée deux fois. Le total des ions de la couche intermédiaire est anormalement haut à deux reprises. Un grand nombre d'analyses chimiques sur un matériel, aussi peu altéré que possible mais aussi pur que possible, est nécessaire, pour préciser les limites des remplacements isomorphiques dans cette série de minéraux.

En conclusion de cette rapide incursion dans le domaine de la Géochimie de la glauconie, on voit des points communs dans les conditions de sa genèse avec celles de l'illite, coïncidant avec sa parenté cristallographique.

Conclusion.

Sauf pour trois roches, n° 3, 19 et 11) qui sont isolées et ne sont pas faciles à interpréter, on voit des lignes générales assez nettes se dessiner, en accord avec la thèse proposée sur la genèse des minéraux argileux. La sédimentation marine oriente les minéraux argileux vers la structure micacée plus volontiers que vers la structure kaolinique. Les proportions varient selon les variations de détail du milieu. Dans les boues très riches en cations Ca, le réseau micacé existe seul ou domine nettement. Dans le sein des vases où des fermentations anaérobies changent l'équilibre du milieu, la kaolinite apparaît. Enfin, dans certains milieux agités, superficiels, et riches en fer ferrique, la glauconie survient.

2° LES ROCHES LAGUNAIRES.

Dans l'ensemble on trouve ici les marnes bariolées si familières aux géologues dans les séries qu'ils réunissent sous la locution de « séries lagunaires » où la sursalure est un caractère fréquent. Ici les couleurs rouges et vertes seront les plus fréquentes, mais aussi le beige, le gris clair, le gris foncé, le brun et parfois le blanc. Toutes ces couleurs bariolées, bigarrées, rutilantes, selon les mots qu'utilisent si volontiers les géologues, sont très différentes de celles des marnes variant du gris-bleu au bleu-noir qui caractérisent les séries marines.

On a vu que les roches d'origine lagunaire sont constituées par des minéraux argileux de structure micacée. Les différents groupes suivants peuvent être faits :

a) *Roches riches en sels figurés. Milieu lagunaire sursalé.*

ROSIÈRES-AUX-SALINES (Keuper — M.-et-M., n° 32) est le type de ces roches argileuses nées au cours d'une sédimentation gypseuse et liée à celle-ci. Le résultat est 100 % de minéraux micacés.

ENSISHEIM (Sannoisien — Haut-Rhin, n° 41) est une roche composée de fines bandes argileuses comprises entre des couches d'anhydrite mêlées de sel. Le résultat est 100 % de minéraux micacés.

MULHOUSE (Sannoisien — Haut-Rhin, n° 40) la proportion de carbonate est grande mais celle de sel marin l'est encore plus. On ignore si c'est à cette raison qu'on doit de voir 10 % de Kaolinite dans la roche.

BAINVILLE-AUX-MIROIRS (Keuper — M.-et-M., n° 31) est tout à fait exceptionnel. Les Rayons X montrent la présence de Montmo-

rillonite dominante sur l'illite, la proportion de K_2O dans la phase argileuse est faible; celle de MgO très forte. Tous ces résultats sont liés. On ne sait si une telle composition est due au fait que l'échantillon étudié est resté des dizaines d'années exposé aux intempéries, dans la carrière abandonnée, ou si la masse de la roche fraîche serait ainsi composée. De toutes façons le résultat est de 100 % de minéraux micacés.

La marne blanche de CORMEILLES-EN-PARISIS (Ludien — S.-et-O., n° 37) est très calcaire et présente des cristallisations de gypse importantes. Le minéral extrait de cette roche est une Attapulgite. On se trouve ici à nouveau devant un minéral riche en silice, mais l'alumine est remplacée en grande partie par la magnésie. Il est inutile d'insister sur la nécessité d'un milieu magnésien pour assurer une telle néoformation.

La phase argileuse extraite du dépôt du CHOTT ECH CHERGUI (Algérie, n° 44), dont on peut connaître la nature des eaux, est composée de 100 % d'illite. Le caractère continental ne change pas le résultat de la sédimentation.

b) Roches lagunaires non sursalées.

* Ici prennent place toutes les roches de l'anhydritgruppe du Muschelkalk : PEXONNE (n°s 23 et 24 — M.-et-M.), DEYVILLERS (n°s 25-26 — Vosges), HOUSSEAS (n°s 27-28 — Vosges), RAMBERVILLERS (n° 29 — Vosges). Le milieu est défini comme lagunaire par la paléogéographie. Les sels figurés existent dans la formation sans se manifester aux affleurements choisis. Le résultat est compris entre 90 et 100 % de minéraux micacés.

c) Roches lagunaires ayant subi des influences marines.

L'étude paléogéographique des marnes de la Lettenkohle de M.-et-M. ainsi que des marnes bleues et des marnes vertes du Sannoisien du Bassin Parisien montre qu'il est possible qu'elles aient subi des influences marines, au moins saisonnières. Ceci correspond à une moins grande concentration en sels, donc en cations, ce qui entraîne toutes les modifications du milieu déjà envisagées. On pouvait donc s'attendre à ce que la phase argileuse extraite de telles roches se rapproche de celles qu'on a trouvées dans les roches marines. En fait, ceci n'est vrai que pour Fresnes. En effet, Damelevières (n° 30 Lettenkohle M.-et-M.) contient à peu près 100 % de minéraux micacés, la marne bleue de Cormeilles-en-Parisis (n° 38 Sannoisien S.-et-O.) en contient encore 90 % malgré de petites et rares concrétions pyriteuses, sa couleur bleue et la présence de fragments de coquille, caractères qui déjà marquent une dessalure. Par contre, la marne verte de Fresnes (n° 42 Sannoisien S.-et-O.) contient 30 %

de Kaolinite, ce qui la rapproche au moins par ce caractère des vases marines.

Doit-on en déduire une précision certaine sur le milieu de genèse des marnes vertes ? Je ne le crois pas. En effet, ce milieu a dû varier au cours du dépôt de cet épisode du Sannoisien du Bassin Parisien. LAVEZARD et VOGT (178-319) indiquent la superposition détaillée des niveaux des marnes vertes de Fresnes, ainsi que la composition chimique correspondante. A la base, la phase argileuse extraite de la marne verte est pauvre en potasse. Au sommet, au contraire, où l'on peut observer des cristallisations de sulfate de strontium, la quantité de potasse augmente. Ceci montre que la sédimentation a varié. Il est possible que l'échantillon étudié ici ait subi des influences marines, ce n'est pas sûr.

d) Roches lagunaires convergentes avec des roches marines.

Le cas de la roche de PECHELBRONN (n° 39 Sannoisien — Bas-Rhin) est bien typique. Considérée unanimement comme lagunaire cette marne montre de la Glauconie dans certains des micro-bancs qui la constituent : il y a donc une certaine convergence au moins saisonnière avec le milieu marin. Par ailleurs d'autres microstrates montrent de la pyrite, le tout indiquant le milieu réducteur propre aux vases. Il y a donc une convergence frappante avec le milieu vaseux décrit pour les marnes bleues marines. Et c'est ce caractère de convergence qui rend compte à mes yeux des 30 % de Kaolinite que révèlent les Rayons X dans la phase argileuse extraite de cette roche. On voit ici d'une manière manifeste que si l'interprétation des faits est correcte, c'est beaucoup plus les conditions de sédimentation que le milieu qui imprime sa marque à la phase argileuse. Il y a pour des milieux différents une convergence des conditions de sédimentation qui entraîne une convergence des produits sédimentés.

e) Milieu lagunaire magnésien.

Les trois échantillons de DOMJULIEN (n°s 33 et 34 Keuper M.-et-M.) et du CHOTT ECH CHERGUI (n° 44 actuel Algérie) sont extrêmement riches en carbonates et en particulier en Dolomite. Ce que l'on sait de la précipitation d'un tel sel en milieu lagunaire laisse penser que les milieux devaient être très basiques et riches en alcalinoterreux : le résultat donne 100 % d'illite. Une fois de plus une forte concentration en cations détermine visiblement la formation des minéraux micacés.

f) Milieux lagunaires mal définis.

La liste des roches étudiées dans le milieu lagunaire s'épuise après la revue qu'on vient de faire pour montrer que le schéma

proposé sur la genèse des minéraux argileux s'illustre convenablement. Il reste pourtant quelques échantillons dont l'interprétation est sensiblement plus difficile. Il s'agit de la terre à dégraisser du Djebel Ghassoul (n° 35, Maroc), des trois argiles smectiques de Mormoiron (n° 36, 36 bis et 36 ter, Vaucluse), de la marne blanche à gypse de Cormeilles-en-Parisis (n° 37, S.-et-O.) et de la terre de Salinelles (n° 43, Gard). Ces roches contiennent comme minéral argileux caractéristique et largement dominant des minéraux du groupe de la Montmorillonite et du groupe de l'Attapulgite (Attapulgite-Sépiolite). Les milieux de genèse sont mal définis : ils paraissent tantôt lagunaires, tantôt lacustres. Des roches du même type sont décrites dans les séries considérées comme lacustres tel que l'échantillon d'Herbéville n° 56, et c'est la raison pour laquelle la discussion de ce problème difficile est rejetée à la fin de ce chapitre.

3° ROCHES D'ORIGINE LACUSTRE.

A) Complexe fluviolacustre de Piedmont.

Ici les phénomènes sont clairs. Ils sont illustrés par les Argilites wealdiennes du Hainaut (n° 45-46), du pays de Bray (n° 48-49) et de Haute-Marne (n° 47). Les roches sont pauvres en cations et ne sont, bien entendu, pas calcaires. Le pH est acide, les acides humiques peuvent être présents, la géologie des lieux de sédimentation indique des eaux courantes rapides, le minéral accessoire le plus courant est du fer peroxydé en concrétions. Tous ces caractères aboutissent au résultat que la roche est formée de Kaolinite largement dominante. Les minéraux micacés sont accessoires et probablement « hérités » d'autres milieux au cours d'un lessivage moins efficace. C'est dans ces gîtes qu'on trouve les argiles réfractaires.

B) Milieu lacustre acide.

Ce cas est illustré par le grand bassin lacustre de Provins (échantillons n° 52-53). Les eaux étaient acides et ne toléraient pas la présence de carbonate de chaux, c'est pourquoi aucune coquille calcaire ne peut être découverte. Les acides humiques sont souvent présents. Des fermentations anaérobies peuvent se produire dans la vase sédimentée et la pyrite survient à la place de la limonite des gîtes précédents. On trouve ici un caractère de convergence avec les vases marines où pourtant les produits déposés gardent encore la marque vigoureuse du milieu marin. Ici au contraire, la Kaolinite se développe abondamment et les terres ainsi déposées sont à nouveau réfractaires quand la pyrite ne vient pas diminuer pour d'autres raisons ses qualités industrielles. Il est probable que le bassin lacustre du Westerwald répond à une telle description : dans l'échan-

tillon n° 54, les minéraux micacés hérités sont pourtant plus abondants. Ils servent de fondant et la terre se vitrifie plus facilement à la cuisson ; elle devient grésante : c'est une terre à grès.

C) Milieu lacustre calcaire.

Dans certains lacs, qui sont à vrai dire les plus nombreux, les eaux circulent lentement et la sédimentation est de nouveau calcaire. Les roches étudiées sont peu nombreuses et ne sont que des témoins, mais on voit aussitôt qu'une telle sédimentation impose le style micacé aux matières silico-alumineuses. La proportion varie sur les cinq échantillons étudiés de 90 à 100 % de minéraux micacés et principalement d'Illite dans ces sédiments. Le résultat est donc le même que pour la sédimentation marine très calcaire et pour la sédimentation lagunaire typique. Ceci montre une fois de plus le phénomène de la convergence des produits de la sédimentation malgré la diversité des milieux de genèse. Les conditions de sédimentation sont elles aussi convergentes et l'évidence du rôle capital des ions calcium lié à un faible renouvellement des solutions apparaît. Pour reprendre une locution imagée de J. DE LAPPARENT, appliquée à d'autres phénomènes, je dis que c'est du *jeu du calcium* dans les milieux de genèse des sédiments que dépend la plus ou moins grande abondance de ceux-ci en minéraux argileux micacés alors qu'il n'entre que pour une *part dérisoire* dans leur structure.

1° LE PROBLÈME DE LA GENÈSE DES ATTAPULGITES ET DES SÉPIOLITES.

J'ai constamment reculé l'examen critique de la sédimentation des roches argileuses contenant de l'Attapulgite ou de la Sépiolite, car cette sédimentation semble particulière. En l'examinant ici, je ne veux que poser les bases de recherches futures car le problème est encore loin de sa solution.

A) Parmi les roches étudiées, dans lesquelles on pouvait s'attendre à rencontrer des minéraux de ce groupe d'après les connaissances reçues, il s'en trouve trois qui n'en contiennent pas. Ce sont les suivantes :

a) La terre à dégraisser de Djebel Ghassoul (n° 35, Jurassique, Maroc). Dans la bibliographie que j'ai pu consulter elle est considérée comme une Sépiolite ou Magnésite. Or l'échantillon que j'ai étudié est constitué d'une Montmorillonite typique.

b) Les échantillons n° 36 bis et 36 ter de Mormoiron (Vaucluse). On les a considérés comme attapulgitiques à l'image de l'Attapulgite type exploitée non loin du lieu de leur prélèvement dans la carrière de la Condamine. En fait, ils sont constitués de Montmorillonite typique.

Le mode de genèse de ces roches ne m'apparaît pas clairement aujourd'hui : une étude sur le terrain est nécessaire. Tout ce qu'on peut dire est que ces roches sont nées en milieu basique et que leur pH actuel est en effet basique.

Les séries géologiques où elles sont incluses sont des séries lagunaires ou laguno-lacustres.

B) D'autres roches étudiées dans ce travail ont montré qu'elles étaient constituées d'Attapulgitite ou de Sépiolite. Ce sont les roches suivantes :

a) Mormoiron n° 36, Ludien inférieur, Gard. Le milieu de genèse est continental. La série encaissante et marneuse contient des lits de calcaires azoïques considérés comme lacustres et des silex jaunes; elle est surmontée de calcaires lacustres à Limnées puis des gypses de Mormoiron. Le pH de la roche est basique.

b) Corneilles-en-Parisis, calcaire marneux blanc à gypse, n° 37, Ludien, S.-et-O. La formation est évidemment sursalée puisque des cristaux de gypse sont contenus dans la roche. S'agit-il d'un lac où des sels se sont concentrés ou d'une lagune en communication avec la mer ? On a vu que les spécialistes en discutent. Le doute est possible; on peut seulement tenir compte des faits : la roche est dolomitique; le pH de la roche est basique.

c) Terre de Salinelles, n° 43, Stampien, Gard. Le milieu est continental. La série est formée d'une alternance de couches à Sépiolite avec des niveaux de calcaires considérés comme lacustres. Certains bancs de cette formation contiennent des Limnées; d'autre part la série contient des silex. Les conditions de sédimentation sont calcaires. Des influences lagunaires saisonnières ne sont pas impossibles à imaginer par l'examen de faciès synchrones situés à proximité. Le pH de la roche est basique.

d) Argilite d'Herbéville, n° 56, Lutétien supérieur, S.-et-O. La série est incontestablement lacustre. La roche est interstratifiée entre une caillasse *siliceuse* et un calcaire, tous deux lacustres, ainsi qu'en témoignent les fossiles. Des influences lagunaires saisonnières ne sont pas impossibles à imaginer par l'examen de faciès synchrones situés à proximité. Le pH de la roche est basique.

En faisant le point après cette énumération on voit que ces quatre échantillons sont nés dans un milieu basique et ont un pH actuel basique. L'Attapulgitite et la Sépiolite sont donc des minéraux qui naissent et qui sont stables en milieu basique. Par ailleurs, on retrouve, pour trois de ces roches, les mêmes termes dans la description des séries géologiques où ils sont inclus : alternance de calcaires et de marnes lacustres, silex ou concrétions siliceuses.

C) De semblables niveaux à Sépiolite ou à Attapulgitite ont déjà été décrits ici ou là, et on peut noter quelques indications à ce sujet.

a) La magnésite du bassin de Paris. On trouve dans A. LACROIX (197) de précieuses indications rassemblées. La magnésite est considérée comme fréquente dans « les calcaires lacustres éocènes et oligocènes du bassin de Paris » où elle est souvent associée aux silex ménilites. A. LACROIX tient de MUNIER-CHALMAS (197) que la magnésite du bassin de Paris s'est formée dans des lagunes en même temps que du gypse et du sel gemme. On trouve en effet parfois dans les lits de magnésite d'énormes cristaux de gypse épigénisés en calcédoine. On a trouvé des lits de magnésite dans les calcaires lacustres à Montmartre, à Ménilmontant, à Argenteuil, aux alentours de l'Arc de Triomphe, à Chenevrières, près de Champigny, à Coulommiers.

b) A. LACROIX range avec les magnésites du bassin de Paris, la quincyite trouvée dans les calcaires siliceux oligocènes du Cher. Le gîte est analogue, il n'est pas sûr que le minéral soit identique.

c) J. DE LAPPARENT (212) cite comme terre à Attapulgitite, en dehors de celle d'Attapulgitite dont j'ignore les conditions de genèse et de celle de Mormoiron, la terre de Lagny, en Seine-et-Marne, qui appartient à nouveau à la série laguno-lacustre du gypse. Par ailleurs, RIVIERE (296) signale dans le bassin de Sézanne des palygorskites en « bancs vert clair au milieu de la série marno-calcaire qui a terminé la sédimentation argileuse de l'Eocène inférieur de cette région ». Il n'est pas douteux qu'on a là des formations lacustres continentales.

Toutes ces indications sont concordantes. Il semble que les Attapulgitites et Sépiolites soient des minéraux qui naissent dans les milieux continentaux lacustres. Dans ces lacs en voie de fermeture, les sels s'accumulent. Le plus généralement la sédimentation est calcaire. Parfois une tendance vers la sursalure se manifeste. La silice tantôt donne des silex, tantôt entre en combinaison avec la magnésie et donne Attapulgitite et Sépiolite. C'est ainsi que pour l'instant je me représente la néoformation de ces minéraux. On les a souvent décrits comme typiquement lagunaires. On a vu que ce n'est pas le cas puisque les grandes lagunes sursalées contiennent de l'illite. Les conditions de genèse ne sont pas très différentes puisque j'ai décrit à deux reprises la présence de minéraux micacés avec l'Attapulgitite. Mais elles semblent être plutôt celles d'un lac calcaire où les eaux basiques peuvent être parfois sursalées et peuvent flocculer avec la silice nécessaire aux silex, un silicate de magnésie tel que la Sépiolite ou un silicate d'alumine et de magnésie tel que l'Attapulgitite. On trouve ici les plus beaux exemples de *néoformation complètement authigène* dans la sédimentation argileuse.

Conclusion du chapitre huitième.

Au cours de ce huitième chapitre, un essai sur la genèse des minéraux argileux dans les milieux de sédimentation a été tenté. Fondé sur les analyses de la deuxième partie et sur les travaux de chercheurs appartenant à diverses disciplines, cet essai mène au schéma suivant : 1° La sédimentation argileuse est différente avec les différentes conditions de sédimentation. 2° Il y a remaniement dans le bassin de sédimentation d'un matériel importé ou hérité par celui-ci. 3° Les équilibres physico-chimiques du milieu conditionnent la nature de la phase argileuse néoformée.

Aucun des facteurs de ces équilibres physico-chimiques n'est indépendant. La variation de chacun d'eux modifie les autres avec l'équilibre lui-même ainsi que la néoformation qui y est stable. Cependant on voit se dessiner les règles suivantes :

1° Parmi les facteurs de l'équilibre physico-chimique du milieu, un rôle prépondérant semble joué par la *présence ou l'absence de cations ainsi que par leur nature*.

2° La présence ou l'absence ainsi que la nature des cations est réglée par leur solubilité dans les eaux du milieu de sédimentation (ex. : eaux carboniques), par la vitesse du renouvellement de ces eaux (ex. : grand lessivage), ou par la qualité des fermentations qui se développent dans le milieu (ex. : bactéries sulfureuses).

3° *L'absence de cations*, qui correspond à un pH acide du milieu, détermine la formation d'un minéral néoformé *riche en alumine du type kaolinite*.

4° *La présence de cations bivalents* qui rendent le milieu basique et provoquent l'élimination de l'alumine des solutions détermine la néoformation d'un *minéral riche en silice du type mica*.

CHAPITRE NEUVIÈME

CONSEQUENCES GÉOCHIMIQUES¹

Introduction

L'ensemble des résultats obtenus aujourd'hui sur les roches sédimentaires argileuses donne une idée de leur constitution. Ces résultats permettent d'envisager sous un jour particulier certains problèmes géochimiques. En effet, les sédiments argileux sont au même titre que tous les sédiments, un produit dont l'origine première est l'altération des continents. A l'opposé, ils sont à l'origine de formations métamorphiques aujourd'hui les mieux connues : celles de la série des roches silico-alumineuses formée des schistes, des micaschistes et des gneiss. Entre la dégradation des roches cristallines et l'origine du métamorphisme, les dépôts argileux forment une étape du cycle immense par lequel passent sans cesse les éléments constitutifs du globe. Déjà, VERNADSKY (382) avait assis une de ses idées générales les plus fertiles sur l'existence d'un noyau kaolinique qui restait intact au cours du cycle. Dans une telle hypothèse, aujourd'hui abandonnée, on voit l'importance que tout géochimiste est obligé d'accorder à l'étape argileuse dans le cycle des silicates d'alumine. Un tel cycle demande encore, pour être connu, une somme de travaux considérables et à chaque instant on se heurte à une inconnue ou à une incompréhension. Il m'a paru qu'une connaissance un peu précise des constituants des roches argileuses jetait une lueur sur certaines de ses étapes. Et c'est cet apport fragmentaire à un si vaste problème qui est exposé, en trois paragraphes, dans ce chapitre.

I. — Remarques sur la composition des schistes argileux et leur sort dans le métamorphisme.

II. — L'altération des roches silicatées.

III. — Le cycle des substances silicoalumineuses.

1. Remarques sur la composition chimique des roches argileuses et leur sort dans le métamorphisme.

L'analyse chimique des argiles et des schistes argileux montre une dominance du Potassium sur le Sodium et du Magnésium sur le Calcium. De nombreux auteurs l'ont remarqué (CLARKE et WASHINGTON; ROSENBUSCH, 336; P. LAPADU HARGUES, 200). Le rapport K/Na est 2.8 pour CLARKE et WASHINGTON (78 analyses), de 4,7 pour 30 analyses faites dans ce présent travail sur des phases argileuses « pures » extraites de roches sédimentaires et de 3.15 environ pour LAPADU HARGUES (200). Le rapport Mg/Ca est de 3 pour les 30 analyses faites dans ce travail et de 4,7 pour P. LAPADU HARGUES.

Or il est connu par les statistiques que ces rapports sont beaucoup plus faibles dans les granites : les statistiques de LAPADU HARGUES permettent de calculer ces rapports qui sont voisins de 1 pour K/Na et de 1/2 pour Mg/Ca. On voit donc que K/Na passe de 3 environ à 1 au cours du métamorphisme des schistes argileux et Mg/Ca de 4 environ à 1/2.

Une interprétation de ces faits, déjà remarqués par ROSENBUSCH (336) fut proposée par cet auteur. Il tient compte de la différence de solubilité des carbonates et des bicarbonates de ces métaux. Ceux de Na et de Ca sont plus solubles que ceux de K et de Mg. Au cours des phénomènes d'altération des massifs contenant des roches silicatées, les silicates calciques et sodiques sont altérés plus facilement. Par contre, les silicates potassiques et magnésiens résistent mieux, sont entraînés mécaniquement et se retrouvent dans les sédiments quartzophylliteux où ils s'accumulent. « Lors du lessivage des silicates, il y a eu entraînement préférentiel de Ca et de Na, dû à la très grande solubilité de leurs bicarbonates, surtout $(\text{Co}^3\text{H})_2\text{Ca}$ qui a amené une teneur de ces deux éléments dans le sédiment détritique résultant » (200).

Cette interprétation de ROSENBUSCH n'est plus admissible aujourd'hui. En effet, il a été amplement démontré que les sédiments argileux qui sont à l'origine des schistes argileux étudiés par ROSENBUSCH et par LAPADU HARGUES ne sont pas des sédiments détritiques par leur phase argileuse silicatée. Même si des particules phylliteuses parviennent aux bassins de sédimentation, ce qui paraît certain, les conditions physico-chimiques qui y règnent les façonnent de manières différentes, ce qui prouve bien que ces dépôts sont,

pour une part importante, authigènes. Or les règles qui dirigent l'édification des minéraux silicatés ne dépendent que de façon lointaine de la solubilité des carbonates des différents cations dans l'eau. Ces néoformations se bâtissent au contraire beaucoup plus en fonction de la *cristallochimie* des silicates et ceci fait une différence majeure avec la sédimentation carbonatée. Il est évident que l'on n'envisage pas ici les cas où les sédimentations argileuses et carbonatées se superposent.

C'est par la connaissance des éléments constitutifs des sédiments argileux, des schistes argileux et de toute la variété des roches quartzophylliteuses, que la composition chimique globale de ces roches nous sera expliquée. On sait, aujourd'hui, que les roches argileuses, qui ne jouent pas un rôle dérisoire dans la lithosphère, sont constituées principalement par la Kaolinite et par l'ensemble des minéraux bâtis sur le type mica : le groupe de l'Illite plus ou moins hydraté et le groupe des Hydrobiotites-Vermiculites de GRUNER et le groupe des Chlorites. C'est l'architecture de ces minéraux qui peut rendre compte de la fréquence des cations Na, K, Ca, Mg dans les roches quartzophylliteuses.

A) MINÉRAUX MICACÉS.

Il s'agit, comme on l'a vu, des minéraux dominants dans la majorité des sédiments.

a) *Ca et Mg dans la couche octaédrique.* — Ces minéraux micacés peuvent admettre dans la couche octaédrique de leur charpente un *remplacement isomorphe* de Al par Fe^{+++} , Fe^{++} et Mg. Par contre le calcium est beaucoup plus gros, son rayon ionique est de 1,06 Å au lieu de 0,78 Å pour le Mg et de plus sa position familière est octocoordonnée et non hexacoordonnée. C'est pourquoi les cristallographes n'admettent pas qu'il puisse se substituer facilement au magnésium. Cette interdiction est la même en sens contraire que celle qui empêche de concevoir des Feldspaths magnésiens, alors qu'ils sont si souvent calciques. Et de fait les Feldspaths magnésiens ne sont pas connus. Au contraire les micas sont magnésiens et non calciques.

b) *K et Na dans la couche intermédiaire.* — Si les réseaux micacés peuvent être magnésiens, ils sont toujours potassiques parce que le potassium, familier de la position dodécaordonnée, trouve une telle situation entre les feuillets micacés dont il assure de ce fait la liaison. Bien que plus petit, le Na peut suppléer le potassium mais toujours pour une faible part. En effet (GRUNER, 159) l'ion sodium préfère les coordinations hexa et surtout octocoordonnées

alors que le potassium préfère les positions dodéca-coordonnées, telles que celles de la structure ouverte des micas. Le Ca est trop petit, comme le Na, pour occuper les positions dodéca-coordonnées qui existent dans le mica et où il aurait aussi des liaisons trop faibles et trop nombreuses. C'est ainsi que les micas sodiques tels que la Paragonite et la Brammalite (8 bis) sont rares dans la nature.

c) *Vermiculites et Chlorites*. — Il n'est pas rare que des feuillets micacés soient liés par des ions magnésiens échangeables ou des couches de Brucite. On se trouve, dans ce cas, dans le groupe des Vermiculites, puis dans le groupe des Chlorites où le magnésium intervient de plus en plus.

Ainsi l'on voit que les minéraux micacés sont construits de telle manière qu'ils sont potassiques et magnésiens mais ne peuvent être qu'en proportion infime sodiques et calciques.

B) MINÉRAUX KAOLINIQUES.

La Kaolinite est également un minéral important dans les séries sédimentaires silico-alumineuses, surtout par sa présence dans les séries marines où elle rivalise parfois avec les minéraux micacés. Rien n'empêche de supposer qu'elle puisse être plus abondante encore dans certaines séries d'origine marine. Il n'est pas admis que le réseau de la Kaolinite puisse supporter un remplacement isomorphique dans sa structure, si bien qu'aucun des cations étudiés ici ne peut y prendre place. On peut alors songer aux cations adsorbés qui sont certainement importants dans les roches kaoliniques comme dans les roches à minéraux argileux micacés. Dans le phénomène de l'adsorption, c'est le potassium qui est adsorbé d'une manière préférentielle dans la nature. On reviendra sur ce point plus longuement.

Au total, on voit par ces raisonnements que les cations présents dans les eaux jouent un rôle inégal dans la sédimentation argileuse. Y participent de préférence les ions métalliques qui trouvent une place « à leur taille » dans les réseaux qui se construisent — et c'est le cas du potassium et du magnésium. Au contraire, restent « sans situation » ceux pour lesquels l'édification du silicate ne présente pas de possibilité d'utilisation — et c'est le cas du Na et du Ca. La sédimentation silicatée n'utilise donc pas d'une manière importante ces deux cations qui, « laissés pour compte », participent à des sédimentations différentes. Le sodium, d'abord accumulé dans la mer où il devient trente fois plus abondant que le potassium, donnera en d'autres lieux les dépôts salins. Le calcium, lui, sera l'élément principal de la sédimentation carbonatée où d'ailleurs le magnésium pourra cette fois venir l'accompagner.

Telles sont, à mon sens, les raisons de la composition chimique des schistes argileux qui est si différente de la composition des roches granitiques qui représentent pourtant le terme ultime de leur métamorphisme. Ce métamorphisme va modifier profondément les proportions initiales. Le rapport K/Na va baisser de 3 à 1 et le rapport Mg/Ca va passer de 4 environ à 1/2.

Les études de LAPADU HARGUES permettent, sur un ensemble fictif moyen de roches, de suivre les phénomènes, d'abord en ce qui concerne les alcalins puis les alcalinoterreux.

a) *Les alcalins*. — Au cours du métamorphisme général, l'apport en potassium est nul au début. Par contre, celui de Na commencera tout de suite jusqu'à rétablir une approximative égalité au niveau des gneiss supérieurs. A partir de cette zone d'isométamorphisme, les teneurs en K et Na croissent ensemble. Un des premiers effets du métamorphisme est donc de compenser dans le matériel silicaté qui lui est livré le déficit de la soude qui s'était trouvée évacuée de la compagnie de la silice et de l'alumine dans l'hydrosphère. On notera que le rétablissement de l'égalité en Na et K coïncide avec l'apparition manifeste des feldspaths dans les gneiss.

b) *Du côté des alcalinoterreux*, les choses sont différentes. La teneur en Mg décroît avec le métamorphisme croissant, tandis que la teneur en Ca remonte. Les courbes de P. LAPADU HARGUES (200) sont très suggestives à cet égard. La décroissance de MgO montre une chute brusque entre les gneiss supérieurs et les gneiss inférieurs, c'est-à-dire entre les gneiss à deux micas et les gneiss profonds à biotite seule. Parallèlement la proportion de CaO remonte régulièrement. On notera que la chute de la magnésie est particulièrement sensible au moment où les feldspaths se développent abondamment à partir de la Muscovite.

Un pas important dans la compréhension de ces variations est fait par l'étude des remaniements structuraux qui accompagnent le métamorphisme. C'est J. DE LAPPARENT (215) qui a montré que la granitisation correspond à un « jeu tétraédrique » de l'aluminium. J. DE LAPPARENT a décrit les faits suivants : d'abord dans l'hydrosphère l'aluminium se trouve en position hexacoordonnée, soit dans les hydroxydes d'alumine, soit dans la Kaolinite. Ensuite, dans la région des schistes et des micaschistes, l'aluminium se trouve réparti entre les positions hexacoordonnées et tétracoordonnées dans le réseau des micas et des chlorites (1/3 tétra, 2/3 hexa.). Enfin, dans le granite caractérisé essentiellement par son feldspath, l'aluminium est tétracoordonné. La symétrie de cette vue est un peu atteinte par le fait que le réseau micacé nous apparaît de plus en plus fréquent dans l'hydrosphère où on l'a vu souvent dominer

celui de la Kaolinite dans les roches sédimentaires. Quoi qu'il en soit, l'ampleur ainsi retouchée de cette « logique » des minéraux du granite subsiste.

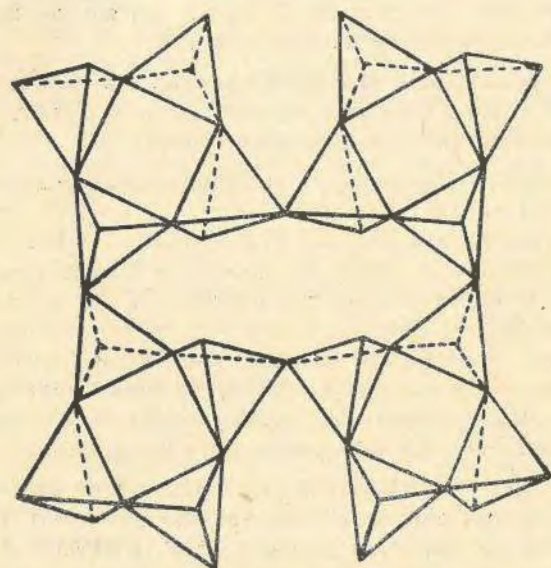


FIGURE 19. — Fragment de la charpente tétraédrique d'un feldspath (d'après J. DE LAPPARENT, 1941).

On voudrait montrer ici comment elle permet d'exprimer d'une autre manière la géochimie des alcalins et alcalinoterreux dans le métamorphisme des roches argileuses. Il faut d'abord traiter des alcalis et du calcium. Ceux-ci fonctionnent d'une manière qui semble étroitement liée au jeu de l'aluminium. En effet, quand on raisonne selon les lois de la cristallogénie, ils servent de « compléments » dans les structures et tout en comblant les lacunes du réseau, ils comblent le déficit de valence qui résulte de l'entrée de l'aluminium dans les tétraèdres en silicium. C'est donc à la fois la qualité et la quantité du jeu tétraédrique de l'aluminium qui sont liées au jeu des alcalins. Dans l'hydrosphère, le potassium est le « liant » majeur de la matière silicatée dans sa position dodécaordonnée entre les feuillets micacés. Le Na et le Ca restent globalement hors jeu. Au contraire, dans les zones où le granite s'est organisé, le jeu feldspathique de l'aluminium s'installe au cours du métamorphisme et le K, le Na et le Ca peuvent tous les trois entrer dans les structures pour combler les lacunes du réseau qui se trouvent cette fois à leur

taille. C'est ainsi que K et Na sont à pied d'égalité au point de vue fonctionnel dans les roches feldspathiques. Remarquons que cette égalité de fonction coïncide avec une égalité de proportions. La teneur en calcium aussi, fonctionnellement égal au K et au Na, se rapproche des teneurs en ces deux métaux, alors que dans l'hydrosphère il était séparé avec le Na des combinaisons silicoalumineuses.

D'une manière semblable, on peut montrer que dans le jeu feldspathique, le magnésium n'a pas de place, non plus que le fer qui lui est semblable et associé. Au fur et à mesure que s'accroît le jeu feldspathique de la matière silicatée, au fur et à mesure qu'à partir du réseau micacé des schistes et des micaschistes, les feldspaths « se régénèrent », le magnésium et le fer se trouvent « sans situation ». En proportion sans cesse décroissante, ils ne peuvent subsister que dans les « ferromagnésiens » des granites. Au total, le fer et le magnésium deviennent de plus en plus rares au fur et à mesure que les structures les tolèrent moins.

C'est ainsi que les variations de composition entre les sédiments argileux et le terme du métamorphisme peuvent s'exprimer de deux manières : dans le langage proprement chimique et dans le langage structural (215-364). Les deux langages soulignent des aspects différents d'un même phénomène et permettent d'approcher différemment sa cause profonde. On peut encore cheminer plus avant dans la description de ces modifications insensibles que subit la matière argileuse au cours du métamorphisme. A la suite de BRAJNIKOV (43) on peut montrer la décroissance de la teneur absolue en oxygène au cours de la transformation des phyllites en feldspaths. A la suite de BARTH (10-11-12), on peut montrer la décroissance du nombre relatif d'oxygène dans les étapes successives formées par la Kaolinite, le mica et le feldspath. A la suite de FAIRBAIRN (105), on peut remarquer que le tassement de ces minéraux décroît avec le métamorphisme croissant. Toutes ces analyses sont suggestives, mais l'important ici était seulement de souligner le comportement différent des silicates d'alumine dans l'hydrosphère et dans la profondeur.

II. L'altération des roches feldspathiques.

Dans l'altération des roches silicatées, des minéraux argileux et des minéraux micacés naissent. Les roches feldspathiques sont les mieux connues à cet égard. La comparaison de ces phénomènes avec ceux de la sédimentation a paru possible.

1° LES ZONES D'ALTÉRATION SOUS NOS CLIMATS :

Les roches feldspathiques, et parmi elles le granite qui servira de matériel commun, s'altèrent volontiers sous nos climats. On peut distinguer deux zones d'altération (J. DE LAPPARENT, 215).

a) *Une zone inférieure* qui correspond à ce que les mineurs appellent la zone de cémentation, où la roche reste massive. La circulation des eaux issues de la surface s'y fait avec continuité et avec une extrême lenteur. La majorité des affleurements naturels que nous considérons comme formés de roche saine appartiennent à cette zone. Il est bien rare que même s'il a été prélevé en carrière et s'il paraît frais, un granite examiné en section mince au microscope ne paraisse altéré dans ses feldspaths. Mais ces feldspaths eux-mêmes ne sont pas altérés de la même manière selon leur nature : s'ils sont plagioclases, ils paraissent parsemés de paillettes blanches de mica blanc : on nomme ce phénomène la séricitisation ou la damouritisation. Pendant ce temps les feldspaths potassiques sont beaucoup moins altérés : s'ils le paraissent, ils sont fortement troublés, sans inclusions lamellaires.

b) *Une zone superficielle* que l'on peut appeler zone d'arénisation, où la roche se désagrège sous l'influence de toutes les intempéries qui provoquent l'efflorescence. La circulation des eaux est rapide. Le travail fait déjà dans la zone de cémentation prépare évidemment cette désagrégation. Les plagioclases tombent en poussière, les feldspaths potassiques résistent mieux et l'ensemble prend l'aspect d'un matériau meuble où les éléments du granite sont disjoints et que l'on appelle une arène. Cette arène pourra subir des sorts différents. Suffisamment lessivée, elle va s'appauvrir encore en éléments feldspathiques, s'enrichira en quartz et plus ou moins micacée elle fournira la matière première des dépôts sableux des bassins de réception. Au contraire, si le défaut de pente ou la végétation retient cette arène, elle va évoluer selon les conditions du milieu qui y règnent; une phase argileuse pourra y naître, sur laquelle on reviendra plus loin.

2° LE CAS PARTICULIER DES GITES DE KAOLIN :

En dehors des gîtes de Kaolin qu'on a quelque raison de considérer comme d'origine hydrothermale, la majorité d'entre eux sont le produit d'altération de roches grenues dont les feldspaths sont acides. Laissons pour l'instant l'histoire antérieure de la roche grenue, qui peut bien avoir prédisposé la roche à cette altération. Dans les gîtes de Kaolin, il n'est pas rare de trouver des cristaux de feldspaths mats mais encore solides; d'autres sont plus blancs, poreux et fragiles; d'autres tombent en poussière dès qu'on les touche. On peut aussi voir ces étapes traversées par les mêmes cristaux abandonnés à la pluie ou dans une rigole voisine de l'exploitation. Des cristaux de feldspaths d'apparence normale se troublent de plus en plus en devenant poreux et fragiles puis ils tombent en poudre kaolinique. *Ce phénomène est localisé dans certains massifs de roches et n'atteint jamais que les pegmatites, les granulites et les roches acides dont les feldspaths sont alcalins.* Les zones d'arénisation et de cémentation sont difficiles à distinguer là car les phénomènes sont vigoureux et la désagrégation se poursuit profondément.

3° DONNÉES CHIMIQUES :

Des données chimiques sur l'altération des silicates et en particulier des feldspaths sont apportées par CORRENS (13). Il rappelle qu'une poudre de feldspath abandonnée dans un récipient avec de l'eau distillée donne à celle-ci un pH 9. Si l'eau est débarrassée du CO₂, le pH atteint est 10. Pour étudier le phénomène en détail, il réalise un dispositif expérimental où l'eau percole à travers la poudre de feldspaths.

Par ce moyen, CORRENS et ENGELHARDT (13, 70) ont montré que le feldspath se dissout à l'état d'ions. En milieu alcalin la dissolution est rapide; la silice et l'alumine dissoutes sont en quantités égales. En milieu neutre, l'attaque est lente, la silice se dissout deux fois plus vite que l'alumine. En milieu acide, l'attaque est rapide, mais l'alumine domine dans la solution. On retrouve ici les règles déjà énoncées par cet auteur et résumées plus haut (page 283).

Dans le même ordre de recherches, DEMOLON et BASTISSE (86-87) ont abandonné à l'altération spontanée dans des cases exposées aux intempéries un granite broyé en fragments de 2 à 4 mm. L'expérience date de 1930; elle se poursuit aujourd'hui. Voici les résultats principaux : dès 1935, les espèces minérales étaient séparées, la pulvérisation s'accroît depuis. Les bases s'éliminent, mais lentement. Les vitesses sont décroissantes dans l'ordre suivant : CaO > MgO > K₂O. Les plagioclases se séricitisent et le milieu non

lamponné a vu sa réaction passer de 6,85 à 7,80. L'eau de drainage SiO_2

montre un rapport $\frac{\text{Sesquioxides}}{\text{SiO}_2}$ de 12 et la fraction fine s'appau-

vrit progressivement en silice. Cette fraction fine, qui semble argileuse, n'a pu être déterminée car elle n'est pas encore parvenue à une organisation qui permette de la rattacher à un type connu. L'ensemble de ces expériences donne une idée des variations possibles de la solution percolant à travers la partie haute d'un massif feldspathique en voie de désagrégation.

4° DONNÉES PÉTROGRAPHIQUES :

J. DE LAPPARENT (204) a minutieusement décrit l'aspect de l'altération des feldspaths au microscope. Dans une roche d'altération moyenne, les feldspaths plagioclases apparaissent en plaque mince saupoudrés de lamelles de séricite. Le feldspath potassique n'en contient pas et apparaît seulement extrêmement troublé par des inclusions et des granulations très fines. Quand l'altération devient plus importante, il arrive que la séricite dessine à travers l'orthose ou le microcline, des canaux ressemblant à des canaux de dissolution mais ceci atteint tous les minéraux de la roche, y compris le quartz et ne peut être considéré comme une altération du feldspath potassique lui-même, mais comme une néoformation dans des fissures.

J. DE LAPPARENT a démontré par des analyses chimiques qu'il y avait bien formation d'un mica potassique et non sodique à partir des plagioclases. Ceci nécessite un apport de potasse et d'alumine et dans la majorité des cas ces éléments proviennent de la dissolution des feldspaths potassiques voisins. En leur absence, c'est la biotite qui s'altère en chlorite, en perdant sa potasse.

KORZHINSKY (196) a étudié récemment les inclusions des feldspaths, principalement des feldspaths potassiques, aux forts grossissements du microscope. Les feldspaths sont en effet rarement limpides dans la nature où au contraire ils paraissent mats. On attribue cela communément à des substances pélitiques qui se développent dans leur sein au cours d'une altération et au premier rang desquels viennent les paillettes de Kaolinite ou de Séricite, auxquelles il faut ajouter hématite, carbonates, hydroxydes de fer. KORZHINSKY attribue le trouble des feldspaths à des inclusions liquides; les unes sont le long des fissures discrètes qui peuvent coïncider avec les plans de clivage; les autres sont dispersées dans la masse du feldspath et forment des inclusions rondes de 1 à 3 μ ; les plus grosses contiennent une libelle mobile. Quand elles atteignent 5 à

15 μ , elles prennent la forme de cristaux négatifs. La nature liquide des inclusions est démontrée par les libelles mobiles, par la réfringence et ses conséquences optiques. Pour KORZHINSKY, un tel phénomène ne semble pas lié à l'altération mais semble spontané quand un feldspath est ramené de la région plus ou moins profonde, où il s'est formé, à la surface, où il se révèle instable.

5° INTERPRÉTATION DU PHÉNOMÈNE DE L'ALTÉRATION FELDSPATHIQUE :

A) Il faut tenir compte d'une histoire antérieure à l'influence des altérations superficielles. Dans la direction des recherches de KORZHINSKY (196), on peut accumuler les arguments en faveur de l'hypothèse d'une altération spontanée des feldspaths quand un massif granitique, né en profondeur et à chaud, se trouve amené en surface. Des remaniements structuraux peuvent se produire spontanément ou encore sous des influences hydrothermales. On ignore si ces transformations nécessitent une circulation ou si elles peuvent se produire en milieu solide. De toute façon, cette désorganisation spontanée des feldspaths, qui serait la conséquence d'un déséquilibre thermodynamique au voisinage de l'affleurement, prépare la voie à l'altération superficielle.

B) Après cette période sur laquelle on est réduit aujourd'hui à des hypothèses, la roche feldspathique passe dans la zone de cimentation où les eaux percolent avec une extrême lenteur. Afin de donner une idée du milieu qui peut régner au cours d'une semblable percolation, j'ai réalisé l'expérience suivante :

Un granite est broyé et passé au tamis 120. Il est tassé le mieux possible dans un tube d'un mètre de hauteur. Un approvisionnement en eau distillée est assuré au sommet du tube. Il faut un mois pour que la percolation se produise. Le pH maximum qui a été mesuré à la sortie du tube est 9,6. C'est dans de telles conditions et selon les règles montrées par CORRENS que les feldspaths sont dissous par hydrolyse. Passent en solution, des cations qui engendrent un pH basique régissant la solubilité de la silice et de l'alumine et leur proportion dans la solution. Le résultat visible dans la zone de cimentation est un trouble des feldspaths potassiques et la séricitisation des feldspaths plagioclases. On peut se demander pourquoi à partir d'une solution sans doute assez constante de l'un à l'autre, « le milieu orthose » et « le milieu plagioclase » réagissent différemment (281). J'en vois la raison dans la présence dans les plagioclases de l'ion calcique divalent et flocculant. Comme dans les milieux de sédimentation, le Ca préside à l'apparition du réseau micacé de la séricite dans les plagioclases.

Les qualités du milieu propice à cette formation sont confirmées par la présence fréquente de menus cristaux de calcite qu'on rencontre dans les plaques minces de la zone de cémentation en voie d'altération. Ceci montre à l'évidence qu'on se trouve bien dans les conditions propres à la précipitation de ce sel. Le rapprochement avec les conditions de sédimentation antérieurement décrites et la liaison statistique entre la présence des ions flocculants et la naissance du réseau micacé, est frappante. Une illustration de ce mécanisme possible est donnée par l'observation des cristaux de feldspaths zonés, où certaines zones peuvent être altérées alors que d'autres restent intactes. Dans l'exemple reproduit à la planche n° II, figure 4, qui est issu d'un granite vosgien, les feldspaths zonés sont constitués par du labrador au centre, avec vers la périphérie un passage progressif albite-anorthose. On peut voir que l'altération en damourite, très prononcée, s'arrête net à la limite d'une certaine zone, alors qu'elle atteignait le cœur du cristal. La périphérie est intacte.

A mon sens, les solutions, si ce sont elles qui dirigent le mécanisme de l'altération, qui percolent à travers les microfissures dans un seul cristal de feldspath zoné ne sont guère différentes d'un point à un autre, mais la présence du calcium à une teneur déterminée dans le plagioclase déclenche le phénomène de la séricitisation, alors que la périphérie est seulement un peu troublée par hydrolyse. Une telle altération différentielle a pu être observée dans de nombreux feldspaths zonés.

C) Dans la zone superficielle, la circulation des eaux est rapide. Chargées d'acide carbonique ou encore des acides humiques venant de la végétation, elles lessivent la roche en voie d'arénisation. Les cations mis en dissolution par hydrolyse entrent en combinaisons solubles avec les anions et sont entraînés vers le bas. Le pH reste voisin de 7 et quand on peut extraire par une dispersion énergique une phase argileuse de ces arènes, on y trouve des mélanges où coexistent l'illite, la Montmorillonite d'une part, l'Halloysite et la Kaolinite d'autre part, ainsi que me l'ont révélé des essais aux Rayons X faits sur quelques arènes de la région du Champ du Feu (Vosges). Si, au contraire, des conditions franchement acides s'établissent — et c'est souvent le cas sous les « Seignes » qui sont des tourbières en formation — la Kaolinite va dominer dans les spectres de Rayons X. Il n'est pas besoin d'insister sur le parallèle qu'on peut faire avec les conditions de sédimentation : 1° franchement basiques en milieu riche en cations, 2° voisines de la neutralité, et 3° franchement acides.

D) En tout ceci, le phénomène de la kaolinisation reste discret. On voit que le phénomène majeur dans l'altération des feldspaths

est l'hydrolyse. Une fois mis en solution, les constituants des silicates d'alumine ont plusieurs possibilités : ou bien ils sont entraînés ou bien ils s'organisent sur place en séricite ce qui est très fréquent, ou bien ils s'organisent en Kaolinite ce qui est rare. Le phénomène de la kaolinisation est donc une exception qui n'affecte que localement la pellicule superficielle des roches en voie d'altération. *Aussi la place que le phénomène de la kaolinisation prend dans l'enseignement et les connaissances communes, paraît de plus en plus abusive et correspond à une véritable erreur.*

Ce phénomène de la kaolinisation manifeste pourtant parfois toute son ampleur dans les massifs où il aboutit à la formation des gîtes de Kaolin. Il est certain que ce problème nécessite de nouvelles études, mais on peut déjà voir quelques lignes se dessiner.

D'abord les Kaolins ne surviennent que dans les roches grenues acides dont les feldspaths sont alcalins, c'est-à-dire ne contiennent pas de plagioclases. Ceux-ci sont calciques : on voit se manifester, une fois de plus, l'opposition entre la présence de calcium et la genèse de la Kaolinite. Il faut ajouter qu'il est fréquent que les Kaolins naissent dans des massifs antérieurement séricitisés. Un granite qui pouvait fort bien être basique a été séricitisé ou transformé en greisen et c'est sur ce matériel débarrassé du calcium, sans préjudice de la disparition d'autres cations, que la kaolinisation peut se produire. Ceci permet d'ailleurs de souligner que la kaolinisation n'est pas liée au matériel « feldspath » mais au matériel « silicate », à condition que les conditions favorables soient réunies.

En deuxième lieu, tous les massifs granulitiques et pegmatitiques exclusivement alcalins et tous les massifs séricitisés ne sont pas kaolinisés, même quand ils appartiennent à une même chaîne et à un même climat. C'est ici que doit intervenir comme cause déterminante l'histoire antérieure du matériel sur laquelle on ne dispose que d'indications où jouent peut-être les phénomènes hydrothermaux.

En troisième lieu, on s'aperçoit que la potasse et la soude des feldspaths alcalins kaolinisés dans de tels gîtes semblent indifférentes à la kaolinisation. C'est sans doute le phénomène où se marque le mieux la différence de fonctionnement qui existe entre les alcalins et les alcalinoterreux. Leur très grande solubilité dans les eaux carboniques et parfois sulfuriques (oxydation des sulfures) et leur faible pouvoir flocculant sont parmi les raisons de cette indifférence.

CONCLUSION :

Il a paru que le parallèle entre cette interprétation de l'altération des roches silicatées et principalement feldspathiques et l'in-

interprétation de la genèse de la phase argileuse des sédiments était intéressant. C'est pourquoi il a été dessiné ici, en envisageant que des recherches futures compléteront ou infirmeront ce schéma.

III. Le cycle des substances silicoalumineuses.

Si l'on parle de cycle pour un phénomène, c'est qu'il ne possède pas d'origine. Arbitrairement, on commencera la description du cycle par l'altération des chaînes silicatées où le matériel organisé dans les profondeurs est livré à l'érosion.

1° L'ALTÉRATION DES CHAINES SILICATÉES :

Les chaînes silicatées représentent l'origine de tous les matériaux qui sont mis en mouvement dans l'hydrosphère. Le phénomène majeur de l'altération est l'hydrolyse. Aidée par les différents facteurs couramment décrits dans les études sur l'efflorescence, l'hydrolyse sépare la masse solide des roches silicatées en plusieurs parties. Une partie est dissoute et évacuée; une partie est dissoute et réorganisée sur place; une partie reste insoluble et reste inerte sur les lieux en attendant d'être entraînée mécaniquement. La silice et l'alumine qui nous intéressent spécialement ici, participent à la constitution d'un grand nombre de minéraux silicatés des roches cristallines mais aucun n'est plus représentatif que les feldspaths qui sont de plus les plus abondants. Ces feldspaths sont hydrolysés: SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , Na_2O et K_2O qui les constituent principalement, sont dissous. Mais une partie seulement de ces sels dissous est évacuée, l'autre partie se réorganise sur place sous forme de séricite et principalement dans le sein même des cristaux de feldspaths plagioclases et dans toutes les fissures de la roche. Les éléments qui participent à cette néoformation silicoalumineuse sont presque exclusivement SiO_2 , Al_2O_3 et K_2O . Le facteur principal qui dirige le phénomène est CaO qui n'entre pas dans la composition des minéraux de néoformation. L'ensemble de cette séricitisation qui caractérise le premier phénomène de l'altération modifie une première fois la proportion de la soude à la potasse. Chacun sait que les eaux issues de la zone de cimentation sont sodiques et le rapport Na/K

dans les eaux douces est voisin de 10 (URBAIN, 368). Le potassium est retenu d'une manière préférentielle dans la roche en voie d'altération, sous forme de séricite.

Le bilan de la première phase de l'altération des roches silicatées est le suivant : la roche est mise en solution et des 7 constituants majeurs de la roche, 3 se fixent momentanément et partiellement sur les débris du matériel. Ce sont la silice, l'alumine et la potasse. Il est juste de reconnaître que le fer libéré sous forme d'hydroxyde de fer colloïdal reste souvent sur place, au moins en partie. Une phase insoluble subsiste. Dans les eaux d'évacuation, le rapport Na/K qui était voisin de 1 dans la roche initiale, devient voisin de 10.

2° LA FORMATION DES SOLS SILICOALUMINEUX :

Parvenue dans la zone superficielle, la roche se désagrège et un sol peut prendre naissance. Les lois de la genèse et de la répartition des différents types de sols constituent la pédologie. Cette science révèle patiemment les mécanismes compliqués où l'entrée en jeu de la matière organique et de la vie s'ajoute aux autres mécanismes qui ont déjà été entrevus.

Les principaux types de sols sont les sols kaoliniques, montmorillonitiques ou illitiques, ainsi que les innombrables sols mixtes. On doit y ajouter les latérites. La nature silicoalumineuse entreposée dans ces sols varie avec les conditions du milieu. Dans l'ensemble, SiO_2 , Al_2O_3 et K_2O restent les éléments associés prépondérants. Avec la Montmorillonite, la Magnésie, la Chaux et la Soude interviennent accessoirement. L'hydroxyde de fer libre accompagne souvent la matière argileuse des sols. Parfois le fer devient très important, en compagnie de l'alumine dégagée de la silice et l'on parvient aux latérites. Le mécanisme de la formation des latérites est dirigé par des lois analogues à celles qui ont été envisagées pour les minéraux argileux : la présence fréquente d'une couche kaolinique à la base des cuirasses latéritiques est un fait important qui doit retenir l'attention.

On peut remarquer que cette étape du cycle qu'est la formation des sols silicoalumineux peut très bien manquer. Le cycle est raccourci et les matériaux silicoalumineux passent directement de l'altération à la sédimentation.

3° LE TRANSPORT DES MATÉRIAUX SILICOALUMINEUX :

A son tour, tôt ou tard, le sol, s'il s'est formé, se détruit, et ses éléments sont entraînés vers les bassins de sédimentation où ils rejoignent les produits directement issus de l'altération des silicates. Ils ne constituaient donc qu'une réserve momentanée dans la dégra-

dation du continent. Ce transport des matériaux issus de l'altération en général, se fait de diverses façons :

a) Il est *ionique* pour une grande partie des matériaux; la silice, l'alumine, le fer, la magnésie, la chaux, la soude et la potasse sont ainsi transportés.

b) Il est *colloïdal* pour la silice, l'alumine, l'hydroxyde de fer.

c) Il est *particulaire* pour les phyllites argileuses et pour tout le matériel détritique. Il est assez normal de songer, en l'absence de documents nombreux, que les phyllites micacées sont largement dominantes dans les boues transportées, étant donné le phénomène majeur de la sérification dans l'altération des silicates.

4° LA SÉDIMENTATION ARGILEUSE :

Le matériel silicoalumineux arrivé aux bassins de sédimentation va donner naissance à des sédiments argileux variables avec les conditions qui règnent dans les différents milieux :

a) dans les lacs acides et les dépôts fluviolacustres fortement lessivés, les sédiments sont kaoliniques.

b) Dans les lacs calcaires, le réseau micacé domine.

c) Dans les lacs basiques pauvres en potasse, riches en magnésie, la Montmorillonite apparaît, parfois l'Attapulgite ou la sépiolite.

d) Les sédiments lagunaires continentaux ou liés à la mer donnent une phase argileuse où le réseau micacé est presque seul.

e) Les sédiments marins varient selon les conditions du milieu où ils se forment. D'une manière générale, les minéraux micacés dominent sur la Kaolinite. Et parmi les minéraux micacés, l'Illite potassique est la plus abondante.

Puisqu'on reconstitue ici un cycle, on doit signaler que les sédiments quels qu'ils soient peuvent, après des phénomènes d'orogénèse, être aussitôt surélevés. Ils sont livrés de nouveau à l'érosion et à l'altération, en prenant un chemin raccourci sur le cycle idéal décrit.

5° INTERDÉPENDANCE ET AUTONOMIE DU CYCLE Si-Al VIS-A-VIS DU CYCLE K-Na.

La sédimentation marine a une importance incomparable par rapport à la sédimentation lacustre ou lagunaire, d'un point de vue géochimique : pratiquement elle fournit la plus grande part des roches sédimentaires silicoalumineuses livrées au métamorphisme. On a déjà vu que la structure phylliteuse de la silice et de l'alumine dans l'hydrosphère expliquait la différence de proportion des sédiments argileux en potassium et en sodium. Les sédiments argileux

sont plus riches en potassium, par voie de conséquence la mer s'enrichit en sodium. Mais ces phénomènes ne sont pas les seuls qui expliquent le comportement différent des ions K et Na dans l'hydrosphère et le caractère très sodique de l'eau de mer. Le phénomène de l'adsorption intervient aussi et il est, lui, indépendant du cycle de la Silice et de l'Alumine. Cette distinction est nécessaire dans l'étude de ce dernier.

Adsorption différentielle du Potassium et du Sodium.

Les statistiques sur les analyses chimiques des sédiments montrent que les roches sédimentaires autres que les roches argileuses contiennent également plus de potassium que de sodium et ceci est attribué depuis longtemps au phénomène de l'adsorption (NOLL, 311; URBAIN, 368; GOLDSCHMIDT, 122; HARVEY, 164). Le rapport K/Na, s'il est de 2,8 pour les schistes, est de 3,3 pour les grès et de 7,7 pour les calcaires. Il est à nouveau voisin de 3 pour l'ensemble des roches sédimentaires. On peut donc dire que les sédiments quels qu'ils soient adsorbent d'une manière préférentielle le potassium. Mais ce qui n'est pas facile à expliquer, c'est la raison d'une adsorption préférentielle aussi importante. Cette importance est montrée par le fait que le sodium, qui est égal au potassium dans les roches cristallines silicatées, est 28,5 fois plus abondant que le potassium dans l'eau de mer. On peut donc dire que si la genèse des minéraux argileux tout du long du cycle est une raison de l'appauvrissement en potassium, le phénomène de l'adsorption différentielle est sans doute encore plus important.

Une interprétation claire de ce phénomène est aujourd'hui possible. Les physiciens ont étudié le comportement des ions en solutions (Mlle SUTRA, 352, 353, 354). Les ions sont classés en différentes catégories suivant leur comportement dans l'eau.

1. Les petits ions à forte charge qui sont hydratés.
2. Les gros ions non hydratés.
3. Les ions de rayon moyen et faiblement chargés, qui n'obéissent plus à la loi de Stokes et qu'on peut appeler pour cette raison Anti-stokes.

Ces propriétés se révèlent par la valeur des rayons ioniques en solution, qui est liée au degré d'hydratation des ions. M^{lle} SUTRA (352) donne la valeur du rayon en solution dans l'eau, d'un certain nombre d'ions. On peut comparer ces rayons en solution (rs) aux rayons cristallins (rc), familiers des cristallographes. Cette comparaison est faite au tableau n° 13.

On voit que $rs > rc$ pour tous les cations sauf K, Rb, Cs et pour

les quatre halogènes. Ce sont les ions antistokes. On peut tirer de ces faits les remarques suivantes :

TABLEAU N° 13

Rayon en solution et rayon cristallin de quelques ions (D'après Melle SUTRA) 1946.

Ion	r_s	r_c	remarque	Ion	r_s	r_c	remarque
H ⁺	0,26			1/2 Fe ⁺⁺	3,42	0,80	
Li ⁺	2,365	0,70		Co ⁺⁺	3,42	0,78	
Na ⁺	1,83	1,00		Ni ⁺⁺	3,42	0,74	
K ⁺	1,24	1,33	Antistokes	Mn ⁺⁺	3,42	0,83	
Rb ⁺	1,20	1,52	Antistokes	La ⁺⁺	3,42	0,83	
Cs ⁺	1,19	1,70	Antistokes	1/3 Al ⁺⁺⁺	4,57	0,55	
Tl ⁺	1,22	1,15		Fe ⁺⁺⁺	4,02	0,67	
Hg ⁺	1,48	0,97		Cr ⁺⁺⁺	4,09	0,70	
1/2 Mg ⁺⁺	3,45	0,75		F ⁻	1,65	1,33	Antistokes
Ca ⁺⁺	3,07	1,05		Cl ⁻	1,20	1,80	
Sr ⁺⁺	3,07	1,18		Br ⁻	1,17	1,96	
Ba ⁺⁺	2,87	1,38		I ⁻	1,19	2,20	

a) Le rayon de K en solution est environ les deux tiers de celui de Na. Les surfaces seront dans le rapport 4/9, c'est-à-dire à peine inférieur à 1/2 et les volumes dans le rapport 8/27, à peine inférieurs à 1/3. L'ion sodium est trois fois plus volumineux en solution que l'ion K.

b) Quel que soit le mécanisme assez compliqué de l'adsorption des ions dans l'eau, sur les particules colloïdales ou minérales qui forment les sédiments, le potassium sera adsorbé en beaucoup plus grande quantité que le sodium.

c) On peut lire dans GOLDSCHMIDT (122) la phrase suivante : « Des expériences directes ont montré que le rubidium et le coesium sont adsorbés à un plus haut degré que le potassium dans les sédiments marins. On en voit aujourd'hui la raison puisque les rayons, en solution, du Rb et du Cs sont encore plus petits que celui du K.

d) Les propriétés exceptionnelles du potassium vis-à-vis des autres cations dans le monde de l'hydrosphère me paraissent ressortir de son comportement en solution. Il est antistokes, il n'est

pas hydraté, son rayon en solution est plus faible que son rayon cristallin et beaucoup plus faible que celui de tous les cations courants. Le Rubidium et le Coesium présentent les mêmes caractéristiques, exagérées, mais ils sont peu abondants.

e) Alors que les rayons cristallins du potassium et du sodium sont voisins (1 et 1,33 Å) et qu'effectivement leur comportement dans le domaine cristallin est similaire, en particulier dans les feldspaths, au contraire, les deux ions fonctionnent très différemment dans l'hydrosphère, en raison de leur attitude différente vis-à-vis de l'eau.

f) Les modifications de la Montmorillonite et de la Vermiculite avec la base échangeable qui leur est fixée sont connues et ont été décrites plus haut (MEHRING, 280; BARSHAD, 9). Quand on a fixé le potassium comme base échangeable, sur ces minéraux, le spectre de Rayons X montre un écrasement du réseau à 10 Å. Il est connu que ceci est dû au fait de la non-hydratation du potassium en solution. Ce dernier, non hydraté, ne provoque aucun gonflement entre les feuillets du type pyrophyllite. Le comportement des autres ions NH₄, Na, Ca, Mg, etc., est à mettre en relation avec leur rayon en solution qui est lui-même une conséquence de leur degré d'hydratation, de même que le comportement du rubidium et du coesium pour les Vermiculites (9).

Quoi qu'il en soit de ces phénomènes dont on soupçonne ainsi une interprétation générale, la sédimentation argileuse étant réalisée dans le sein des mers, les ions SiO₂, Al₂O₃, K₂O sont réunis pour en former la substance. Fe et Mg les accompagnent pour une part. Le Na et le Ca sont grosso modo hors jeu.

6° LE MÉTAMORPHISME :

C'est ce matériel qui va être livré au métamorphisme de la série silicoalumineuse. La roche argileuse va passer au schiste puis au micaschiste puis au gneiss et enfin au granite. Bien que la nature des phyllites des schistes soit assez mal connue, les renseignements qu'on possède (FAIRBAIRN, 106; BATES, 16) montrent qu'ils sont formés en dehors du quartz, de phyllites micacées des types séricite, muscovite et chlorite. Le problème revient donc en ne considérant que l'évolution de la matière silicoalumineuse à la voir passer par les étapes suivantes :

1° Sédiments : Kaolinite, Illite, Hydrobiotites-Vermiculites et Chlorites.

2° Schistes : Séricite. Chlorite.

3° Micaschistes : Muscovite. Biotite.

4° Gneiss : Feldspaths. Biotite.

Il n'est pas question de poser ici le problème du métamorphisme mais on veut tenter de montrer comment le cycle silicoalumineux peut se fermer et comment géochimiquement les grandes lignes des transformations peuvent être entrevues, du point de vue si spécial de la nature des phyllites silicoalumineuses.

A. — La transformation de la Kaolinite.

La Kaolinite se détruit à 520° sous l'influence de la chaleur. L'étude de briques réfractaires a montré l'organisation de la mullite à haute température. Il ne semble pas que ce phénomène puisse atteindre le sédiment argileux au cours du prémétamorphisme. Le minéral qui apparaît semble exclusivement micacé. Cependant, pour réaliser le réseau micacé, il manque de la potasse. On peut la chercher parmi les ions adsorbés par le sédiment, mais on ne sait si ceci est suffisant. M. ROQUES (1) dans ses analyses de schistes arrive souvent à un déficit tel en potasse qu'il est obligé de calculer une pyrophyllite que pour l'instant il est difficile de déterminer dans les roches. Le problème n'est pas résolu.

B. — Transformation de l'illite.

La transformation de l'illite pose des problèmes moins difficiles. Le réseau micacé existe et se développe. Néanmoins, l'illite est plus pauvre en potasse et plus riche en eau que la Muscovite. Mais c'est aussi le cas de la Séricite. Le passage de l'illite à la Séricite ne présente pas de difficultés; celui de la Séricite à la Muscovite nécessite un apport de potasse. On peut supposer que ce n'est que lorsque cet apport se réalise que la Séricite se développe en Muscovite. On peut aussi imaginer une deuxième fois une étape silicoalumineuse non potassique (Pyrophyllite ? Sillimanite).

C. — Passages entre les minéraux à 10 et 14 A°.

Il est connu que la Montmorillonite, par effet de la température et de la pression ainsi que par saturation au potassium, donne un édifice à 10 A° (172). Les hydrobiotites peuvent se transformer en biotites par remplacement de leurs bases échangeables par le potassium ou par un chauffage assez intense. On entrevoit de cette manière des mécanismes possibles pour le passage de 14 à 10 A°. Mais plus difficile est le problème de la genèse des chlorites, si fréquents dans la série schisteuse. On doit en rechercher l'origine non seulement dans la faible proportion de Chlorite contenue dans les

(1) Renseignement oral.

roches sédimentaires mais dans la proportion plus commune d'Hydrobiotite-Vermiculite.

Les expériences de M^{re} CAILLÈRE et HENIN (51-57-58) montrent un mécanisme qui, sans être celui qui se passe au cours du prémétamorphisme, est intéressant. Il suggère que les relations qui existent entre certains types minéralogiques ne sont pas si distinctes dans la réalité qu'on pourrait le croire. Par un traitement au chlorure de Mg d'une Montmorillonite, M^{re} CAILLÈRE et HENIN (51) ont obtenu un minéral fort semblable à une chlorite, montrant la raie à 14 A°. En particulier, le traitement à l'eau et au glycérol, n'a pas modifié la position des raies dans le spectre. La variation des raies de base sous l'influence de la chaleur (57) a confirmé qu'un réseau très voisin de celui de la chlorite avait été obtenu. Enfin (58) ces auteurs ont pu parvenir expérimentalement à ouvrir les feuillets micacés en les transformant en Vermiculites. Il y a donc des passages possibles entre Mica, Montmorillonite, Vermiculite et Chlorite sur lesquels on commence à avoir quelque lumière.

Mais on a vu que la proportion des Hydrobiotites-Vermiculites est assez faible dans les roches argileuses. A l'opposé la proportion de la Chlorite est souvent importante dans les schistes. On peut comprendre l'augmentation de la proportion de phyllites magnésiennes de type chlorite par le mécanisme suivant :

Au cours du métamorphisme, un des phénomènes les plus marquants et les plus continus est l'augmentation de la taille des phyllites jusqu'au développement des cristaux lamellaires que sont les micas. Ce phénomène peut aujourd'hui être interprété. L'intensité des phénomènes d'isomorphisme dans les minéraux argileux est grande. HENDRIKS (176) a souligné que c'est à cause de ces remplacements et du manque de régularité dans l'empilement ionique que les cristaux des minéraux argileux sont petits. Au cours du métamorphisme, l'intensité de ces remplacements diminue.

Si l'on raisonne sur l'évolution de l'élément dominant des schistes représentée par l'évolution Illite — Séricite — Muscovite on voit que l'augmentation de la cristallinité correspond à une chasse des éléments différents de ceux qui constituent la Muscovite typique. Ce sont, en particulier le Fer et le Mg qui sont écartés du réseau micacé heptaphyllite de plus en plus homogène et la chlorite puis la biotite gagnent, en compensation, de l'importance. On peut dire qu'à partir d'un mélange sédimentaire où l'illite, la Chlorite et l'Hydrobiotite sont mêlées avec interstratifications possibles, l'évolution dans le métamorphisme va trier les cations. L'aluminium alimentera les paillettes de Séricite grandissante; le Fe et le Mg, les phyllites

chloriteuses en croissance. La réalisation d'empilements ioniques plus réguliers est liée à la naissance de cristaux mieux formés et plus grands, et de types minéralogiques mieux définis.

D. — Passage du schiste au micaschiste.

Le schiste, essentiellement caractérisé par la séricite et la chlorite, passe au micaschiste où se trouvent la muscovite et la biotite. Si le passage de la séricite à la muscovite nécessite un essorage et un léger apport de potasse dont la source peut être trouvée soit dans la roche elle-même à partir des ions autrefois adsorbés par le sédiment, soit à partir d'un apport, la formation de la biotite, elle, nécessite un remplacement du magnésium par le potassium. Le problème est clair, on voit là qualitativement une première manifestation de la chasse du magnésium et de l'augmentation du potassium. Si l'on saisit bien le phénomène global, on comprend mal le mécanisme.

E. — Régénération des Feldspaths.

On a déjà discuté ce point. La muscovite se transforme en feldspath par tétracoordination de l'aluminium. Les alcalins s'organisent alors différemment pour combler les vides de la texture. La biotite ne peut se feldspathiser car le magnésium et le fer ne peuvent prendre place dans un réseau feldspathique. Je vois dans ce phénomène une des caractéristiques majeures du passage des gneiss supérieurs aux gneiss inférieurs où la biotite reste seule à représenter les minéraux phylliteux. C'est ici qu'on peut souligner la différence de comportement de la muscovite et de la biotite. La première est beaucoup plus sensible au métamorphisme que la seconde, pour la raison qu'elle a des possibilités de réarrangement. La substance silicoalumineuse dans sa fraction essentielle n'est plus, à partir de ce moment, phylliteuse mais feldspathique. Cette nouvelle nature se révélera bien éphémère quand, ramenées à la surface, les roches feldspathiques seront rapidement séricitisées tandis que la biotite évoluera en chlorite et que le cycle indéfiniment recommencera.

CONCLUSION.

Dans le grand nombre des variables qui sont en jeu dans l'essai de reconstitution d'un tel cycle, on peut avoir un schéma simple en raisonnant sur l'alumine.

- 1° L'alumine est essentiellement feldspathique dans le granite.
- 2° A peine arrivée dans le domaine de l'hydrosphère, en parvenant dans la zone de cimentation, elle se partage en deux parties : l'une est mise en solution, l'autre devient très généralement micacée, rarement kaolinique.

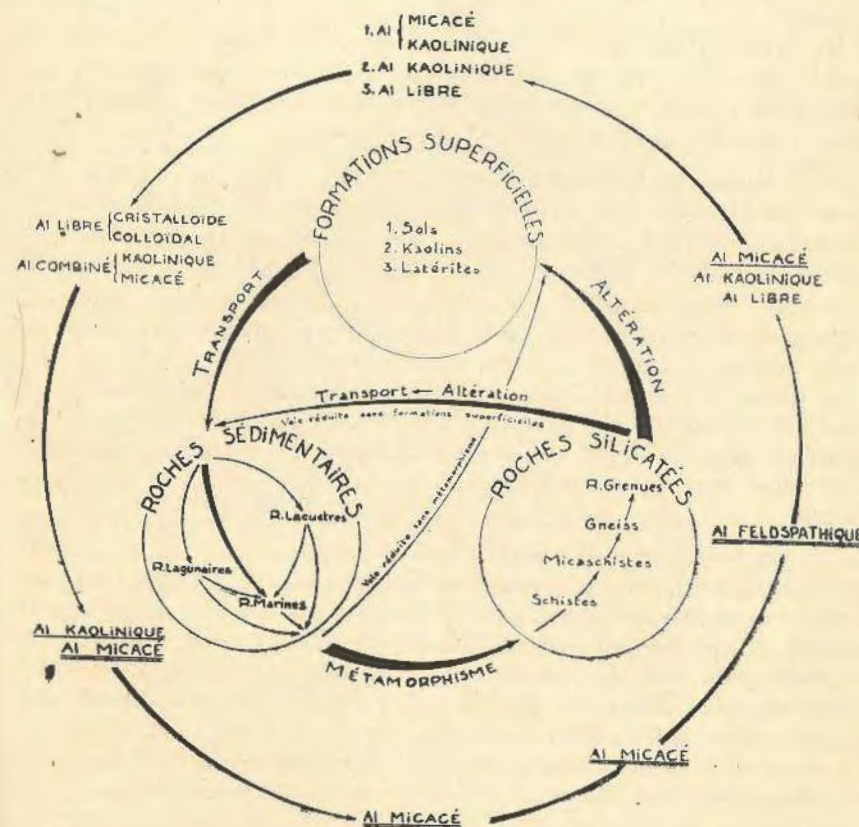


FIGURE 20. — Cycle géochimique de l'Aluminium.

3° Ce partage subsiste dans la vie des sols et dans le transport par les eaux courantes, avec un point spécial dans la latéritisation qui est le seul fragment du cycle où l'alumine solide n'est pas combinée.

4° Dans la sédimentation, l'alumine devient phylliteuse en se liant à la silice. Elle est kaolinique dans les milieux pauvres en cations ou acides, micacée dans les milieux riches en cations, milieux d'ailleurs de beaucoup les plus fréquents.

5° Au cours du métamorphisme, le caractère phylliteux des silico-aluminates se poursuit en devenant exclusivement micacé (séricite, muscovite, chlorite, biotite), puis l'aluminium de la muscovite se feldspathise pour reformer, par les gneiss, les granites.

6° Au cours du cycle, l'aluminium est hexacoordonné dans les oxydes, les laterites et dans la kaolinite; il est reparti entre les positions hexacoordonnées et tétracoordonnées dans le réseau micacé ($1/3$ tétra., $2/3$ hexa.). Enfin il est complètement tétracoordonné dans les feldspaths du granite. On voit que l'aluminium passe au cours du cycle, de la pleine liberté chimique où il est hexacoordonné, à la dépendance géochimique dans les silicates où il est tétracoordonné.

7° On voit que plus l'aluminium appartient à un milieu débarrassé de cations, plus il est libre et hexacoordonné. Quand il appartient à un milieu riche en cations, il est tétracoordonné. Le comportement du potassium, du sodium, du calcium et du magnésium coïncide pour une part importante avec celui de l'aluminium mais d'une manière différente pour chacun d'entre eux. Le jeu de ces cations est de plus différent dans les cristaux et dans les solutions. La silice et l'alumine sont combinées de préférence à K et Mg dans l'hydrosphère et à Na, K et Ca dans les roches cristallines.

8° Enfin, on a souvent l'impression que ce sont les cations qui commandent le jeu de l'aluminium dans l'hydrosphère. Du côté du métamorphisme, on est tenté d'attribuer le rôle de facteur déterminant au jeu de l'aluminium plutôt qu'à celui des cations. Il est probable que nous n'avons là que des illusions et que l'aluminium, comme les ions alcalins et alcalinoterreux, ne fait qu'obéir aux règles thermodynamiques qui dirigent l'évolution de l'écorce terrestre, évolution dont les mécanismes seront sans doute connus un jour.

Voici comment on peut présenter le cycle des substances silico-alumineuses. Cette présentation est forcément partielle mais elle est aussi partielle puisque c'est par le « côté des argiles », ainsi que l'aurait dit J. DE LAPPARENT (218), que j'ai été amené à de semblables réflexions.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

En guise de conclusion je présenterai un essai de reconstitution de quatre « milieux de genèse ». Paysages continentaux ou fonds sous-marins, ces quatre milieux illustrent au mieux le mécanisme qu'on peut imaginer aujourd'hui pour expliquer la genèse des roches argileuses sédimentaires.

1°. Au pied d'une montagne.

Le premier paysage que je veux évoquer se situe au pied d'une montagne cristalline qu'un mouvement tectonique vient de surélever. Les géographes décrivent là, à la limite des montagnes et des plaines, une zone de piedmont, où s'étendent très aplatis de longs cônes d'alluvions en face de l'ouverture sombre des vallées. La pluie et la neige provoquent, sur les roches cristallines des sommets et des pentes, une altération lente mais profonde. Les eaux ruissellent et entraînent les produits d'altération de toutes sortes. Ces eaux circulent rapidement, bondissent de cascade en cascade et, bien aérées, restent sans cesse saturées par les gaz dissous dans l'air. En parvenant au bas des montagnes, dans la « plaine de piedmont » la pente diminue, le régime torrentiel cesse. L'énergie des eaux faiblit et celles-ci se répandent en divaguant. Elles abandonnent les produits qu'elles transportaient. Des sables et des graviers se superposent en couches minces. La succession des dépôts abandonnés par un flot variable avec les saisons est irrégulière et entrecroisée.

De temps à autre, une couche d'argile se dépose à partir des éléments les plus fins transportés dans une période plus calme. Elle va se trouver prisonnière, avec une forme de lentille, sous ce cône aplati où les eaux s'épanchent d'une manière capricieuse. A l'occasion d'une crue, des bois flottés et des feuillages avec des graines, arrachés aux forêts des montagnes, sont alignés et enfouis. Ils se

transformeront en un mince niveau de lignite. Rarement quelque poisson ou quelque coquillage d'eau douce parvient à se conserver à l'abri d'un niveau d'argile en échappant à l'action dissolvante des eaux. Par hasard, l'un des habitants des rivages, égaré dans ces lieux mouvants vient s'y enliser et meurt. Son squelette retrouvé plus tard, comme ceux des Iguanodons de Belgique, viendra témoigner des formes de la vie continentale à une époque ancienne.

Les qualités des eaux dans une telle région ne sont pas indifférentes. Les visiteurs de nos montagnes cristallines le remarquent bien quand ils en apprécient la saveur et s'aperçoivent que l'eau « rince mal le savon ». Le savent mieux encore, ceux qui construisent les canalisations et qui voient les meilleurs tuyaux métalliques rongés et percés en dix ans. Ces eaux constamment agitées et chargées de bulles d'air sont agressives car saturées de l'oxygène et du gaz carbonique de l'atmosphère. Elles sont acides et oxydantes. Acides, elles dissolvent rapidement les bases. La chaux, la magnésie, la soude, la potasse, l'oxyde de fer qui pourtant existent dans les roches altérées, sont rapidement entraînés au fur et à mesure de leur libération. Oxydantes, les eaux assurent la peroxydation du fer qui devient ferrique.

L'action de ces eaux se poursuit tout au long du trajet sur le matériel qu'elles transportent avant de le déposer par apports successifs sur la masse conique des alluvions « du pied du mont ». Traversant alors l'épaisseur des sables accumulés, l'eau les lessive encore, comme dans un filtre, mais elle perd en même temps son acidité. N'étant plus capable de tenir le fer en solution, celui-ci précipite, colorant de jaune, de rouge ou de brun les obstacles qu'il rencontre, ou s'agglomérant en concrétions de limonite à la base de la formation.

Telle est la reconstitution du complexe fluvio-lacustre au pied d'une chaîne cristalline, cristallophyllienne ou schisteuse. On y trouve parfois des lentilles d'argile. Le grand lessivage, l'absence de bases, l'acidité des eaux ont fait de cet argile un matériau où domine le minéral qu'on appelle la Kaolinite. C'est l'argile la plus précieuse pour les hommes et la plus coûteuse. En effet, pauvre en bases, elle est réfractaire. C'est ainsi que sont nés la majorité des « Kaolins sédimentaires » aux rares époques successives où de tels mécanismes ont été possibles.

Parmi ces époques, deux sont particulièrement suggestives. A la fin du Jurassique une émigration a permis les dépôts wealdiens continentaux à la base du crétacé du N.-O. de l'Europe. De même à l'Eocène un phénomène semblable se produisit, autour du Massif Central; les dépôts de piedmonts sont typiques pendant cette période,

tant vers le Sud-Ouest dans le Sidérolithique des Charentes et du Périgord, que vers le Nord dans le Sparnacien arkosien de Breuillet prolongé par le lac de Provins.

Un dernier point, sur lequel il convient d'insister, est que la chaîne ainsi démantelée doit être cristalline, cristallophyllienne ou encore schisteuse. Les chaînes revêtues encore de leur carapace sédimentaire en grande partie calcaire donnent bien des complexes fluviolacustres de piedmont, mais les eaux sont chargées de sels minéraux et leurs qualités sont autres. Le cône de Lannemezan, par exemple, ou celui de Riez Valensole, sont stériles en argiles kaoliniques. De même les mollasses oligomiocènes d'Aquitaine qui descendent des Pyrénées et qui recouvrent le sidérolithique issu du Massif Central sont détritiques mais calcaires et stériles en cette matière première de choix.

2°. Le lac calcaire.

Les eaux qui s'échappent de la zone de piedmont parviennent dans la grande plaine que certains géographes nomment la « plaine du niveau de base ». Les bassins de nos grands fleuves français donnent une mauvaise idée de ces immenses étendues horizontales, situées presque au niveau de la mer, où le régime lacustre régna sur d'immenses surfaces. Par contre les géologues ont reconstitué de tels systèmes lacustres dans l'Île-de-France par exemple, l'Aquitaine, le bassin Rhodanien et la Limagne au début du Tertiaire. Les eaux se répandent là beaucoup plus calmes; les sels basiques arrachés aux montagnes s'y accumulent. La sédimentation est fréquemment calcaire. Parfois l'alluvionnement apporte à ces bassins les menues paillettes argileuses drainées par les rivières affluentes. Des marnes, voire même des argiles, se déposent. Les mollusques continentaux, Limnées, Planorbes, Escargots, Unios peuvent y laisser leur coquille sans qu'elle soit mise en solution par les eaux. De grands vertébrés terrestres peuvent s'y perdre et s'y enfouir.

Les eaux se renouvellent mal, elles restent douces mais des bases y séjournent et leur réaction est déjà alcaline. Elles ressemblent assez à l'eau potable des pays calcaires qui laisse dans les bouilloires une croûte de « tartre ». La matière argileuse va s'organiser ici d'une autre manière que dans le pays précédent. Généralement elle prendra une structure et une composition analogues à celles du mica mais en particules infimes telles que sont celles d'une

argile : il s'agit du minéral argileux le plus commun parmi ceux qui constituent les roches sédimentaires à la surface du globe, il se nomme l'illite. Son accumulation réalise une argile riche en silice, pauvre en alumine, riche en bases. Cette terre fond facilement quand on la met au feu, elle est bonne à faire des tuiles, des briques et des pots à fleurs.

3°. Le fond de la mer.

Tôt ou tard le matériel mis en mouvement à la surface des continents parviendra à la mer par les fleuves. On a la preuve de l'intensité de cet apport par la couleur des rivières en crues, par les dépôts voisins de certaines embouchures en forme de delta et par le rapide envasement de certains ports. Les particules minérales sont parvenues cette fois dans un bassin de sédimentation beaucoup plus vaste. Le sens commun et les mesures des océanographes montrent sa fixité et sa monotonie. En fait les dépôts marins sont extrêmement variés, malgré l'apparente constance de la mer au premier regard. Cette variété est sans doute largement influencée par la nature des produits apportés à la mer ainsi que par le jeu des courants répartissant ces derniers d'une manière variable dans les diverses régions des océans. Tantôt de fines particules minérales sont apportées en suspension, tantôt des sels comme le calcaire sont en solution. Si l'on étudie les matières argileuses déposées dans les boues marines on voit que le minéral qui y domine est à nouveau l'illite et les minéraux, voisins des micas, qui l'accompagnent. Ce résultat est identique à celui de la sédimentation dans les lacs calcaires et sans doute la raison commune en est-elle dans leur commune réaction basique avec ses causes et ses conséquences. Ceci se vérifie aussi bien dans les boues marines très riches en calcaires que dans les boues vertes où la matière argileuse s'appelle la glauconie qui n'est qu'un produit voisin de l'illite très riche en fer.

Cependant les choses se révèlent différentes quand on étudie les vases marines. Ce sont des boues particulières, collantes, mi-solides mi-liquides, riches en matières organiques et d'une odeur désagréable. Grises, bleues ou noires, il est probable qu'elles correspondent dans le passé aux marnes ou argilites bleutées si fréquentes dans nos séries géologiques marines. Avant d'examiner en quoi consiste cette différence, voyons les points communs. La vase marine est formée de l'accumulation de fines particules, de matières orga-

niques et des micro-organismes du plancton ainsi que des précipitations de calcite à partir de l'eau de mer. Bien sûr, on y trouve aussi la trace fossile d'une foule d'invertébrés vivant dans la mer ou sur le fond. On peut même y découvrir par chance le squelette fossile d'un vertébré marin portant le témoignage complémentaire de ses contemporains continentaux. En somme la vase marine est bien un sédiment héritant ses constituants de son milieu de sédimentation.

Mais, et c'est ici la différence considérable, la vase marine réalise sous une mince pellicule protectrice un milieu spécial presque complètement isolé de l'eau de mer elle-même. A très peu de distance de sa surface la vase est complètement privée d'air et seules les bactéries anaérobies peuvent s'y développer. C'est en particulier le cas des bactéries sulfureuses qui réduisent les sulfates alcalins de l'eau en acide sulfhydrique à l'odeur nauséabonde. Celui-ci donne avec les oxydes de fer un sulfure de fer colloïdal susceptible d'évoluer ultérieurement en pyrite. Cet exemple montre le caractère tout à fait particulier de ce milieu presque autonome vis-à-vis de la mer, où le pH baisse sensiblement ainsi que la teneur en carbonates. La matière argileuse soumise à une telle influence se révèle être un mélange de Kaolinite et de minéraux micacés comme si les phénomènes étaient intermédiaires entre les deux milieux décrits précédemment. Il est juste de remarquer que, jusqu'à présent, je n'ai pas trouvé une proportion supérieure à 50 % de Kaolinite, mais il n'y a aucune raison pour que cette proportion ne soit pas dépassée dans certaines vases marines.

4°. Les lagunes sursalées.

Le dernier milieu de sédimentation que je veux évoquer parce qu'il est typique est celui des lagunes sursalées. On en possède une bonne image aujourd'hui par le golfe de Kara Bogaz, accroché au flanc Est de la Caspienne ou par un Chott africain. Le premier ressemble à un golfe marin presque fermé soumis à une évaporation intense qui le concentre. Le second est continental, alimenté par des sources profondes ou latérales légèrement salées; il se concentre par évaporation. De telles étendues et d'autres beaucoup plus vastes furent dans les temps géologiques transformées en de tels marais salants. On peut citer la plaine d'Alsace à l'Oligocène qui livre aujourd'hui des sels de potasse, l'Ile-de-France à la fin de

l'Eocène et son gypse, enfin l'Europe occidentale dans son ensemble, pendant le Keuper, avec ses gîtes de sel et de gypse.

La vie n'était guère possible en ces milieux. Les géologues recherchent avec peine quelque trace fossile qui paraît aussitôt très précieuse. La sédimentation était exclusivement minérale et des couches de roches salines se déposaient, alternant avec d'innombrables couches d'argile. Ce sont ces dernières qui nous intéressent ici. Elles sont souvent bariolées, rutilantes, vertes, jaunes, brunes ou lie-de-vin. Elles sont souvent réparties sur de longs espaces géologiques contenant çà et là des lentilles salines. Les eaux furent évidemment riches en bases et à réaction alcaline. On retrouve ici exagéré le caractère des lacs ou des mers calcaires et l'on n'est pas étonné de découvrir que le minéral principal qui se forme est l'illite et ses compagnons micacés.

C'est ainsi que les faits parlent aujourd'hui. L'inventaire des sédiments fossiles et surtout des sédiments actuels est à peine commencé. Que deviendra ce schéma après les études futures ? je l'ignore. Détruit, modifié ou complété, j'espère qu'il se révélera utile dans la connaissance des phénomènes naturels.

Avant de terminer, je voudrais insister sur quelques idées générales qui m'ont paru instructives et qui sont illustrées par ce travail.

1°) Convergence des conditions de sédimentation et Réciprocité des lois établies.

Je m'étais fixé il y a quelques années le but de chercher les différences présentées par la nature des argiles dans les différents milieux de sédimentation définis qui nous sont accessibles par les sédiments fossiles. Un peu naïvement, sans doute, je pensais que chaque milieu se caractérisait par une « argile » différente. Cette hypothèse n'était pas exacte et les choses se présentent bien autrement. Le milieu de sédimentation continental ou marin, n'est rien. Seules importent les conditions de sédimentation réalisées dans ce milieu. Et l'on a vu la CONVERGENCE de ces conditions de sédimentation dans les milieux de genèse les plus DIVERS. En même temps, CONVERGENT les résultats de la sédimentation, c'est-à-dire les argiles déposées. De même qu'il existe des calcaires ou des

sables qui sont marins ou continentaux, et qui sont à tout prendre du carbonate de chaux et de la silice, de même il existe des argiles minéralogiquement identiques dans les milieux de genèse, continentaux ou non. Ceci est important afin de ne pas s'élancer trop vite à la recherche de la réciproque des lois qu'on vient d'établir. Saisir aujourd'hui une roche argileuse, faire l'analyse la plus complète possible de ses constituants, et déduire de cette étude son origine est impossible sans graves risques d'erreurs. On doit tenir compte pour parvenir au but de toutes les observations possibles, sur le gîte de la roche et la paléontologie de l'horizon. La pétrographie vient en aide : je suis le dernier à en sous-estimer l'intérêt, mais, aujourd'hui, seule, elle resterait souvent impuissante. Une argile grise contenant 60 % de minéraux micacés et 40 % de Kaolinite peut être une vase marine : elle peut provenir aussi d'une terrasse fluviale. Ces deux roches ne présentent aucun rapport d'origine en ayant seulement quelques aspects communs.

On doit donc souligner la fréquence de la convergence des conditions de sédimentation dans les divers milieux. Ceci doit rendre prudent dans le maniement du raisonnement par réciproque. Ce sont les conditions de sédimentation qui règlent la genèse des minéraux argileux sédimentaires et non les milieux de genèse eux-mêmes.

2°) Sédimentation chimique et sédimentation biologique.

Il y a bien longtemps que les géologues ont distingué les roches par leurs origines, tantôt biologiques, tantôt chimiques, tantôt détritiques, avec tous les types intermédiaires. Mais nos termes sont bien schématiques pour recouvrir la variété des phénomènes naturels.

Prenons l'exemple des vases marines bleues. L'origine première des phyllites argileuses, qu'on y trouve, est en suspension dans la mer et en dernier ressort continentale. Le milieu chimique de l'eau de mer doit façonner cet apport minéral et lui donner son cachet définitif. D'après ce que je crois aujourd'hui, c'est le style micacé qui doit se développer. Mais voici que dans la vase presque isolée de la mer qui la surmonte des phénomènes bactériens se développent. Ils créent un milieu tout à fait spécial qu'on pourrait appeler, si l'on ne craignait le jeu de mots, le « milieu vaseux ». La matière argileuse alors prend un cachet inattendu où Kaolinite et mica

sont mêlés. A-t-on le droit de dire qu'une marne bleue marine est à la fois détritique, chimique et biologique ? Poser la question donne la réponse.

On peut signaler en outre une sorte d'antagonisme entre les facteurs chimiques et les facteurs biologiques dans la sédimentation marine. Plus le dépôt aura le caractère d'une boue meuble, aérée et très calcaire, plus il sera riche en minéraux micacés. Plus le dépôt aura le caractère d'une vase riche en matières organiques et sulfureuses, plus il sera riche en Kaolinite. Ainsi rivalisent deux mécanismes dans le même sédiment. On peut imaginer qu'ils s'ajoutent dans une vase d'un lac acide tel que le lac de Provins.

On peut donc ici souligner l'influence des actions biologiques sur les constituants minéraux des sédiments. L'effet de ces actions biologiques s'ajoute ou s'oppose à la sédimentation proprement chimique. Il y a là, semble-t-il, une nouvelle manière pour la vie de régir la nature des roches.

3°) Stabilité et Evolution du milieu interne des Roches sédimentaires.

Au moment où les sédiments ont déposé des néoformations minérales, celles-ci sont en équilibre avec le milieu qui les a façonnées. Dans l'évolution qui mène d'un sédiment à une roche, les équilibres physico-chimiques internes à la roche ne restent certainement pas constants. Il y a essorage considérable, suppression de la vie, augmentation de la pression et assez vite de la température. Cependant des caractères subsistent qui semblent sinon identiques du moins semblables à ceux qu'on peut raisonnablement imaginer pour le sédiment primitif. Disons que le milieu intérieur d'une roche garde par rapport à celui du sédiment dont il est issu des caractéristiques qui semblent *du même ordre*. Un bel exemple en a été donné par la mesure de l'acidité des roches argileuses mises dans l'eau et rendues grosso modo à leur état primitif de boues. L'étude des sédiments actuels pèsera beaucoup pour vérifier cette affirmation sur d'autres caractères des roches. On peut donc parler d'une sorte de fossilisation de certains caractères d'un sédiment. Sans doute, ils furent altérés comme les fossiles organiques eux-mêmes, mais comme ces derniers ils sont reconnaissables et semblent assez

caractéristiques du milieu d'origine. Cette stabilité n'est pas éternelle. Si les roches sont amenées à la surface du sol par l'érosion, elles sont soumises à des influences tellement différentes de celles de leur milieu de genèse que l'équilibre est rompu et la dégradation commence. Certains éléments comme le calcaire se dissolvent à l'altération, la matière argileuse, elle, évolue. En contact avec un nouveau milieu aqueux, des modifications lentes vont se produire et souvent de nouveaux types minéralogiques survenir. La période de stabilité est terminée. Une nouvelle évolution commence.

On peut donc souligner que le milieu interne d'une roche possède certains caractères du sédiment originel, figés, conservés, fossilisés, à peu près intacts ou tout au moins du même ordre de grandeur qu'à l'origine. Si la roche est changée de milieu par des influences extérieures, la stabilité séculaire cesse et une évolution nouvelle commence.

4°) Coïncidence et Divergence dans les cycles géochimiques.

L'un des travaux passionnants qui s'offre au géochimiste est de reconstituer le chemin des différents éléments chimiques au cours de l'évolution du globe. Si l'on appelle cycle géochimique la suite des opérations suivantes : altération — transport — sédimentation — métamorphisme et mise en place des massifs cristallins, chaque atome travaille le long de ce cycle selon des lois qui lui sont propres. On peut alors chercher pour chaque élément son cycle particulier. La tâche n'est pas facile mais les trajets connus s'allongent.

Il apparaît que les éléments font route commune assez souvent mais peuvent se séparer pour un temps avant de se retrouver. J'illustrerai ceci par le comportement de Na et de K dans le cycle géochimique. Ces deux atomes ont un comportement qui n'est pas identique dans les cristaux des roches profondes en raison de leur taille différente pour une même charge. Mais tout de même ils sont unis dans l'édifice cristallin le plus caractéristique des roches « magmatiques » qu'est l'édifice feldspathique. Cette structure leur réserve dans l'empilement indéfini des oxygènes et des silicium une place commune convenable où tous deux se trouvent à l'aise.

Parvenue dans l'hydrosphère la structure feldspathique est ins-

table et les deux alcalins sont libérés. Mais aussitôt en solution les deux atomes réagissent différemment. Ils n'ont pas vis-à-vis de l'eau le même comportement et leurs routes divergent. L'un, le potassium, sans affinité pour l'eau, s'adsorbe avec facilité sur toutes les particules qu'il rencontre. Si ces particules sont silicoalumineuses et les conditions convenables, il s'organise avec elles pour former un nouveau réseau cristallin où il est seul à pouvoir s'établir : le réseau du mica. L'autre, le sodium, reste libre, circule avec les eaux, s'accumule dans la mer et n'est livré à nouveau au cycle géochimique que par une sédimentation saline particulière.

Ainsi, ayant fait trajet commun dans les profondeurs solides, deux atomes si semblables se séparent dans le trajet du cycle où l'eau intervient. Plus compliqué serait l'inventaire de la coïncidence et de la divergence des cycles de Ca et de Mg. Unis dans la sédimentation carbonatée (Dolomite), ils se séparent dans la sédimentation argileuse. En profondeur le calcium est essentiellement feldspathique où il rejoint Na et K. Pendant ce temps, Mg se joint à Fe et se trouve cantonné dans les minéraux qu'on nomme pour cela ferro-magnésiens : micas, pyroxènes et périclites. Les coïncidences et les divergences de leurs cycles se compliquent et viennent coïncider ou diverger avec ceux des autres éléments.

On peut souligner dans les cycles des divers éléments chimiques des comportements communs pour certains de ces derniers. Mais cette communauté de fonctionnement est souvent éphémère. Par exemple deux atomes qui jouaient des rôles semblables dans la profondeur où règne l'état cristallin se séparent momentanément dans l'hydrosphère où ils sont en solution. Les profondeurs cristallines et les profondeurs sous-marines s'opposent donc encore par leur utilisation différente des ions métalliques.

BIBLIOGRAPHIE

1. — ALAIS, FOUCHECOUR, REIS. — Note préliminaire concernant l'emploi du microscope électronique à l'étude des catalyseurs, terres décolorantes, bentonites et schistes. Revue de l'Institut français du Pétrole, n° 7, juillet 1947.
2. — ALBAREDA HERRERA (J.-M.), RODRIGUEZ MUNOZ (C.). — Fenomenos de ordenacion y reoanotropia de arcillas. Anal. Inst. esp. Edafol. Ecol. Fisiol. veget. Sept. Déc. 1947, 6, pp. 475-541.
3. — ALDRICH (D.-G.), HELLMANN (N.-N.), JACKSON (M.-L.). — Hydration control of montmorillonite as required for its identification and estimation by X-Ray diffraction methods. Soil Science, Mars 1944, 57, pp. 215-31.
4. — ANDREATA (C.). — L'origine dei reticoli a strati nell'alterazione dei minerali costituenti le rocce. Period. Mineral., 1947, 16, n° 3, pp. 269-97.
5. — ANGLADE (R.), REIS (T.). — Note sur l'application des ultrasons à la préparation d'échantillons pour microscopie électronique. Revue de l'Institut français du Pétrole, vol. III, n° 11, nov. 1948, pp. 313-16.
6. — ARUJA (E.). — An X-Ray study of the crystal-structure of antigorite. Miner. Mag., mars 1945, 27, pp. 65-74.
- 6 bis. — AUBERT (G.). — Annales agronomiques, 1939, t. IX, p. 568.
7. — AUBRY (J.), TURPIN (G.). — Dosage du quartz libre dans les minerais de fer de Lorraine. C. R. Ac. Sciences, Paris 1949, t. 228, n° 26, pp. 2030-1.
8. — AUTHELIN (C.). — Sur le Toarcien des environs de Nancy. Bull. Soc. Géol. de Fr., 1899, 3^e série, t. XXVII.
- 8 bis. — BANNISTER (F.). — Brammallite (sodium illite) a new mineral from Llandeby South Wales. Miner. Mag., t. 26, 1943, pp. 304-307.
9. — BARSHAD (I.). — Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange relations, X rays analysis, differential thermal curves, and water content. American Mineralogist, vol. 33, nov.-déc. 1948.
10. — BARTH (T.-F.-W.). — The distribution of oxygen in the lithosphere. Journ. of Geol., 1948, vol. 56, n° 1, pp. 41-49.
11. — BARTH (T.-F.-W.). — Oxygen in rocks : a basis for petrographic calculations. Journ. of Geol., 1948, vol. 56, n° 1, pp. 50-60.
12. — BARTH (T.-F.-W.). — A propos de la distribution de l'oxygène dans la lithosphère. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 1948, n° 12, p. 246.
13. — BARTH (T.-F.-W.), CORRENS (C.-W.), ESKOLA (P.). — Die Entstehung der Gesteine. Ein Lehrbuch der Petrogenese. J. Springer, Berlin, 1939.
14. — BARTHOUX (J.). — Notes de métallogénie marocaine. II. La magnésite du Maroc. Annales des Mines, juin 1923.
15. — BARY (P.). — Revue Générale des Colloïdes, 6, 1928, p. 209.
16. — BATES (T.-F.). — Investigation of the micaceous minerals in slate. Amer. Mineralogist., nov.-déc. 1947, 32, pp. 625-36.
17. — BAYLEY (W.-S.). — Kaolin in North Carolina with a brief note on hydro-mica. Economic Geology, 1920, 15, pp. 236-246.
18. — BENOIST (M.). — Note sur le grès infraliasique du département de la Meurthe. Ann. de la Sté Linnéenne de Bordeaux, t. XXVII, 1867.
19. — BENOIST (M.). — Notes pour servir à l'étude des étages jurassiques inférieurs aux environs de Nancy. Actes de la Sté Linnéenne de Bordeaux, 1868-1869.
20. — BERGOUNIOUX (F.-M.). — Sur la genèse des argiles sidérolithiques. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., n° 8, mai 1947, p. 167.
21. — BERTRAND (L.), LANQUINE (A.). — Sur la composition et la structure microscopique des argiles. Leur fusibilité et les transformations qu'elles subissent à haute température. Bull. Off. des Recherches et Inventions, n° 27, 1922.
22. — BERTRAND (L.). — Sur l'emploi en céramique des méthodes d'examen

- microscopique de la pétrographie dans l'étude de la structure des argiles et de leurs transformations à la cuisson. La Céramique, juin 1923, Paris.
23. — BILLIET (V.). — Quelques aspects de la Minéralogie moderne. Bull. Soc. Belge Géol., Paléontol., Hydrol., 1944, 53, n° 3, pp. 179-98.
- 23 bis. — BLAYAC (J.). — Les Chotts des Hauts Plateaux de l'Est Constantinois. Origine de leur salure. Bull. Soc. Géol. Fr., t. 25, 1897, p. 906.
24. — BLEICHER (G.). — Sur un nouvel horizon paléontologique du Lias moyen de Lorraine.
25. — BLEICHER (G.). — Origine et nature des nodules et concrétions des terrains marneux du Jurassique de Lorraine.
26. — BLEICHER (G.). — Note sur la limite inférieure du Lias en Lorraine. Bull. Soc. Géol. Fr., 1884, t. XII.
27. — BLEICHER (G.). — Recherches micrographiques sur quelques roches du Muschelkalk lorrain. Feuille des Jeunes Naturalistes, 1892.
28. — BLEICHER (G.). — Sur le gisement et la structure des nodules phosphatés du Lias de Lorraine. Bull. Soc. Géol. Fr., 1892.
29. — BLEICHER (G.). — Sur la découverte d'une nouvelle espèce de Limule dans les marnes irisées de Lorraine. Bull. de la Soc. des Sciences de Nancy, 1897.
30. — BOSAZZA (V.-L.). — The Petrography and Petrology of South African Clays. Thèse, 1948, Johannesburg.
31. — BOURCART (J.), FRANCIS-BOEUF (Cl.). — La Vase. Actualités scientifiques et industrielles, n° 927, Hermann et Cie, Paris, 1942.
- 31 bis. — BOURCART (J.). — Recherches sur quelques calcaires lacustres du Bassin de la Loire. Bull. Soc. Géol. Fr., t. XVI, 1946, 5^e série, pp. 331-345.
32. — BOURCART (J.). — Stratification ou « Litage ». C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 1944, pp. 75-77.
- 32 bis. — BOURCART (J.). — Etude des carrières du département du Loiret. Circulaire D. n° 18, Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics, 1947.
- 32 ter. — BOURCART (J.). — Sur les vases du Plateau continental français. C. R. Ac. Sci., Paris, 1947, t. 225, n° 2, p. 137.
33. — BRACONNIER (M.-A.). — Description géologique et agronomique des terrains de Meurthe-et-Moselle. Berger-Levrault, Nancy, 1883.
34. — BRADFIELD. — The chemical nature of colloidal clay. Journ. Am. Soc. Agron., 1925, t. XVII, pp. 253-270.
35. — BRADLEY (W.-F.). — The structural scheme of Attapulgit. Amer. Mineralogist, 1940, vol. 25, n° 3, pp. 204-5.
36. — BRADLEY (W.-F.). — Diagnostic criteria for clay minerals. Amer. Mineral., nov.-déc. 1945, 30, pp. 704-13.
37. — BRAGG (W.-L.). — Atomic structure of Minerals. Oxford University Press, London, 1937.
38. — BRAGG (W.-L.), WARREN (B.-E.). — The structure of chrysotile $H_4Mg_3Si_2O_9$. Zeitschr. Krist., 1930, 76, pp. 201-210.
39. — BRAJNIKOV (B.). — Recherches sur la formation appelée « argile à silex » dans le Bassin de Paris. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam., 1937, pp. 1-90 et 109-120.
40. — BRAJNIKOV (B.), MALYCHEFF (Vera). — Sur un constituant de néoformation et sur le milieu physicochimique de quelques formations super-fuclles. Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam., t. XI, 1938, pp. 249-53.
41. — BRAJNIKOV (B.). — Quelques considérations sur l'évolution des limons. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. XII, 1942, p. 91.
42. — BRAJNIKOV (B.), FRANCIS-BOEUF (C.), ROMANOVSKY (V.). — Techniques d'étude des sédiments et des eaux qui leur sont associées. Actualités scientifiques et industr., n° 952, Hermann et Cie, Paris, 1943.
43. — BRAJNIKOV (B.). — Sur la distribution de l'oxygène dans la lithosphère. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. XV, 1945, p. 329-336.
44. — BRAMMAL (A.), LEECH (J.-G.-C.). — Hydrolysis of Rock-forming minerals. Nature, 1937, 139, p. 753.
45. — BRAMMAL (A.), LEECH (J.-G.-C.). — Base exchange and its problems. Science Journ. Roy. College of Sci., 1938, 8, pp. 43-51.
46. — BRINDLEY (G.-W.). — Crystallographic Studies of Kaolinite, Halloysite and related Minerals. Silicates Industriels, Bruxelles, vol. XIV, n° 3, mars 1949, pp. 147-50.

47. — BUVIGNIER (A.). — Statistique minéralogique, métallurgique et paléontologique du Département de la Meuse. Paris, 1852.
- 47 bis. — CAILLERE (S.). — Etude de la dissociation thermique des minéraux des serpentines. C. R. Ac. Sci., Paris, 1933, p. 528.
48. — CAILLERE (S.). — Etude de quelques silicates magnésiens à faciès asbestiforme ou papyracé n'appartenant pas au groupe de l'Antigorite. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. LIX, 1936, pp. 353-373.
49. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Formation d'une phyllite de type kaolinique par traitement d'une Montmorillonite. C. R. Ac. Sci., Paris, 6 janv. 1947, t. 224, pp. 53-55.
50. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Application de l'analyse thermique différentielle à l'étude des argiles des sols. Annales Agronomiques, 1947.
51. — CAILLERE (S.), HENIN (S.), MERING (J.). — Passage expérimental de la Montmorillonite à une phyllite à équidistance stable de 14 Å . C. R. Ac. Sci., Paris, 17 mars 1947, t. 224, pp. 842-3.
52. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Sur une synthèse de l'Antigorite à basse température. C. R. Ac. Sci., 1947, t. 224, p. 1439.
53. — CAILLERE (S.), BETREMIEUX (R.), HENIN (S.). — Examen des argiles de quelques sols tropicaux. C. R. Ac. Sci., Paris, 3 nov. 1947, t. 225, pp. 818-20.
54. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Sur la préparation et quelques caractères d'une série d'aluminates hydratés. C. A. Ac. Sci., Paris, 16 fév. 1948, t. 226, p. 580.
55. — CAILLERE (S.), HENIN (S.), MERIAUX (S.). — Transformation expérimentale d'une Montmorillonite en une phyllite à 10 Å type Illite. C. R. Ac. Sci., Paris, 1948, t. 226, pp. 680-1.
56. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Sur la signification des résultats de l'analyse thermique différentielle. Verre et Silicates Industriels, t. XIII, n° 9, 1948, pp. 114-118.
57. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Comportement thermique de quelques phyllites à 14 Å . C. R. Ac. Sci., Paris, 14 mars 1949, t. 228, pp. 933-5.
- 57 bis. — CAILLERE (S.), HENIN (S.). — Experimental formation of chlorides from Montmorillonite. Min. Mag. June 1949, n° 205, pp. 612-620.
58. — CAILLERE (S.), HENIN (S.), GUENNELON (G.). — Transformation expérimentale du mica en divers types de minéraux argileux par séparation des feuillets. C. A. Ac. Sci., Paris, 1949, t. 228, n° 22, pp. 1741-2.
- 58 bis. — CAILLEUX (A.). — Distinction des sables marins et fluviatiles. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. XIII, 1943, pp. 125-138.
59. — CARPENTIER (A.). — Recherches sur les végétaux fossiles des argiles eocéniques du Pays de Bray. Bull. Soc. Géol. Fr., 1929, pp. 89-96; 1933, pp. 89-94; 1934, pp. 35-41.
60. — CAYEUX (L.). — Contribution à l'étude micrographique des terrains sédimentaires. Thèse, Lille, 1897.
61. — CAYEUX (L.). — Introduction à l'étude pétrographique des Roches sédimentaires. Mémoire Serv. Carte géol. Fr., Paris, 1916.
62. — CAYEUX (L.). — Les Roches sédimentaires de France : les roches siliceuses. Mémoire Serv. Carte géol. Fr., 1929.
63. — CAYEUX (L.). — Les Roches sédimentaires de France : roches carbonatées (Calcaires et Dolomies). Masson et Cie, éd., Paris, 1935.
64. — CHARRIN (V.). — Les terres décolorantes : les gisements français. Chimie et Industrie, etc. 1936.
65. — CHARRIN (V.). — Les argiles colloïdales en France métropolitaine. Chimie et Industrie, 1943, vol. 50, n° 4, pp. 115-116.
66. — CHARRIN (V.). — Les argiles smectiques de Mormoiron (Vaucluse). Génie Civil, Paris, 1944, t. 121, n° 7, p. 58.
- 66 bis. — CORNUEL (J.). — Mémoire sur les terrains crétacé inférieur et supra-jurassique de l'arrondissement de Vassy. Mém. Soc. Géol. Fr., t. IV, 1841.
76. — CORRENS (C.-W.). — « Sédimentation dans les mers profondes ». Wissenschaft. Ergebn. Deutsch. Atlant. Expedition auf dem Forschungs u. Vermessungsschiff Meteor, 1937, Berlin, vol. 3, partie 3.
68. — CORRENS (C.-W.). — Die Tone. Geol. Rund. 29, H. 3, 5, 1938; pp. 201-219.
69. — CORRENS (C.-W.). — Zur Frage der Neubildung von Glimmer in jungen Sedimenten. Geol. Rund., 29, H. 3, 5, 1938, pp. 220-222.
70. — CORRENS (C.-W.), ENGELHARDT (W. von). — Neue Untersuchungen über

- die Verwitterung des Kalifeldspates. *Chemie der Erde*, Bd 12, 1938, pp. 1-22.
71. — CORROY (G.). — Le Néocomien de la bordure orientale du Bassin de Paris. Thèse, Nancy, 1925.
 72. — CORROY (G.). — Ressources minérales de l'Infracrétacé ou Néocomien de la Bordure Est du Bassin de Paris. *Revue Industrielle de l'Est*, 1926.
 73. — CORROY (G.). — Synchronisme des horizons jurassiques de l'Est du Bassin de Paris. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 4^e série, t. XXVII, 1927, p. 95.
 74. — CORROY (G.). — Vertébrés du Trias de Lorraine et Trias lorrain. *Annales de Paléontologie*, t. 17, 1928.
 75. — CORROY (G.). — Le Rhétien et l'Hettangien dans l'Est du Bassin de Paris. *C. R. Ac. Sc.*, t. 195, p. 157, 1932.
 76. — CORROY (G.). — Le Callovien de la Bordure orientale du Bassin de Paris. *Mémoire du Serv. Carte géol. de la France*, 1932.
 77. — CORROY (G.). — Le Toarcien de la Lorraine et de la Haute-Saône. Récur-rance du faciès schisteux à Posidonomyes. *C. R. Ac. Sci.*, t. 194, 1932, p. 632.
 78. — CORROY (G.), GERARD (Ch.). — Le Toarcien de Lorraine et du Bassigny. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. III, 1933, pp. 193-226.
 79. — COUDERT (P.), MATHIEU (G.). — Sur une nouvelle coupe dans le Lias inférieur et moyen des environs de Nancy. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 1949, n° 7-8, pp. 129-32.
 80. — CUSHMAN (Ph.-D.). — Foraminifera. Sharon, Mass., USA, 2 vol. 1933.
 81. — DEICHA (G.). — Zones bimensuelles, saisonnières, annuelles dans le gypse parisien. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, n° 9, 1942, p. 83.
 82. — DEICHA (G.). — Sur les conditions de dépôt dans le Golfe du Gypse pari-sien. *C. R. Ac. Sc.*, t. 214, 27 mai 1942, p. 863.
 83. — DEICHA (G.). — La vitesse de sédimentation chimique salifère et les chiffres d'évaporation annuelle. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 1944, pp. 140-143.
 84. — DEMOLON (A.), BASTISSE (E.-M.). — *Ann. Agron.*, 1934, pp. 53-76.
 85. — DEMOLON (A.), BASTISSE (E.). — Sur la dispersion des colloïdes argileux. *Annales Agron.*, 1935, n° 1, pp. 1-15.
 86. — DEMOLON (A.), BASTISSE (E.). — Genèse des colloïdes argileux dans l'altération du Granite en cases lysimétriques. *Annales Agron.*, 1936, t. VI, pp. 803-810.
 87. — DEMOLON (A.), BASTISSE (E.). — Observations sur les premiers stades de l'altération spontanée d'un granite et la genèse des colloïdes argileux. *C. R. Ac. Sci.*, 17 juil. 1946, t. 223, pp. 115-8.
 88. — DEMOLON (A.). — *Principes d'Agronomie*. Tome I. Dynamique du Sol. Dunod, Paris, 4^e édition, 1948.
 89. — DENIZOT (G.). — Les formations continentales de la région orléanaise. Thèse, Paris, 1927.
 - 89 bis. — DENIZOT (G.). — Sur les conditions de dépôt de l'Oligocène en France. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 3 févr. 1947, p. 46.
 90. — DERIBERE (M.). — Applications géologiques de la notion de pH. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 1938, pp. 17-19.
 91. — DERIBERE (M.). — Observations sur le pH de quelques bauxites. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, 1938, pp. 299-300.
 92. — DERIBERE (M.). — Contrôle du pH des eaux et argiles de l'Aven d'Orgnac. « L'Aven d'Orgnac » (Ardèche), par R. de Joly.
 93. — DESCHAZEAUX (C.). — L'Oxfordien supérieur de la bordure Est du Bassin de Paris. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. I, 1931, pp. 353-391.
 94. — DIETZ (R.-S.). — Clay minerals in recent marine sediments. Thèse, Uni-versité de l'Illinois, 1941, in *Amer. Min.* 1942, vol. 27, n° 3.
 95. — DREYFUSS (M.). — Une méthode simple pour l'exécution des plaques minces de marnes. *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs*, n° 43, 1933.
 96. — DREYFUSS (M.). — Les schistes bitumineux du Toarcien de Franche-Comté. *Congrès des Soc. Savantes de Franche-Comté à Lure*, 1933, et *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs*, n° 43, 1934, pp. 46-48.
 97. — DREYFUSS (M.). — Problèmes posés par les minéraux argileux. *Bull. Soc. Hist. Nat. Doubs*, n° 44, 1934.
 98. — DREYFUSS (M.). — Méthodes pour la séparation de la fraction argileuse des roches sédimentaires. *C. R. Ac. Sc.*, t. 199, p. 1631, 1934.
 99. — DREYFUSS (M.). — Les Marnes du Lias de Franche-Comté. Besançon, 1935.
 100. — DURAND (André). — Kimméridgien de la Meuse et de la Haute-Marne.

- Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1932, t. 2, 5^e série, pp. 293-335.
101. — EDELMAN (C.-H.). — Relations entre les propriétés et la structure de quelques minéraux argileux. *Verre et Silicates industriels*, t. XII, n° 6, 1947, pp. 3-6.
 102. — ENDELL (K.), HOFMANN (U.), MAEGDEFRAU (E.). — Über die Natur des Tonanteils in Rohstoffen der Deutschen Zement Industrie. *Zement*, 1935, 24, p. 625.
 103. — ENDELL (J.). — Nachweis der Forestruktur von Fullererde (Attapulgit) im Elektronenmikroskop. *Z. Nat. Forsch.*, nov.-déc. 1946, I, pp. 646-9.
 104. — FABER (Gustave). — Recherches en vue de la possibilité d'une exploitation industrielle du schiste bitumineux du Toarcien dans le Grand-Duché de Luxembourg. *Publ. du Service géol. du Luxembourg*, vol. VII, 1947.
 105. — FAIRBAIRN (H.-W.). — Packing in ionic minerals. *Bull. geol. Soc. Amer.* Sept. 1943, 54, pp. 1305-74.
 106. — FAIRBAIRN (H.-W.). — X ray petrology of some fine grained foliated rocks. *Amer. Mineralogist*, 1943, n° 28, pp. 246-256.
 107. — FERSMANN (A.). — *Mémoire Ac. Sci. St-Petersbourg* (6), 2, 1908, 645.
 108. — FERSMANN (A.). — *Mémoire Ac. Sci. St-Petersbourg* (8), 32, 1913, 2.
 109. — FINATON (Ch.). — Les dépôts lagunaires et le gypse du Bassin parisien. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam.*, 1934, p. 357.
 110. — FINATON (Ch.). — La formation des gisements salifères. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam.*, 1935, p. 285.
 111. — FINATON (Ch.). — Essai d'interprétation mathématique de quelques phé-nomènes de sédimentation. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dynam.*, 1937, pp. 255-263.
 112. — FLEISCHER. — *American Mineralogist*, 1943, 28, p. 470.
 113. — FOLK (R.-L.). — The alteration of feldspar and its products as studied in the laboratory. *Amer. Journ. of Science*, juin 1947, 245, pp. 388-94.
 114. — FRANCIS-BOEUF (Cl.). — Les Océans. *Coll. Que sais-je ?*, Paris, 1942.
 115. — FRANCIS-BOEUF (Cl.). — Sur la teneur en oxygène dissous du milieu inférieur des vases fluviomarines. *C. R. Ac. Sci.*, t. 225, 1947, p. 392.
 116. — GALBUTSKAYA, GOVOVORA. — *Min. Syrja*, 1934, n° 4, pp. 27-32.
 117. — GALPIN (S.-L.). — Studies on Flint Clays and their associates. *Trans. Amer. Ceramic Soc.*, Vol. XIV, 1912, pp. 301-46.
 - 117 bis. — GAUTHIER (M.). — Le problème hydraulique du Chott ech Chergui. Service de la Colonisation et de l'Hydraulique. Gouvernement général de l'Algérie, 1947.
 118. — GERARD (Ch.), GARDET (G.). — L'Hettangien et le Sinémurien inférieur moyen de Meurthe-et-Moselle. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. VIII, 1938, pp. 529-579.
 119. — GERARD (Ch.), TETRY (A.). — Le Charmouthien de Meurthe-et-Moselle. *Bull. Soc. Sciences Nancy*, 1938, n° 10-11, pp. 167-191.
 120. — GIGNOUX (M.). — *Géologie stratigraphique*, 3^e éd. Masson et Cie, Paris, 1943.
 121. — GILLET (S.). — La faune oligocène de Pechelbronn. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. 14, 1944, pp. 233-47.
 122. — GOLDSCHMIDT (V.-M.). — Les principes de la répartition des éléments chimiques dans les minéraux et les roches. *Journ. of Chemical Soc.*, 1937, p. 655.
 123. — GOLDSCHMIDT (V.-M.). — The geo-chemical « background » of minor-element distribution. *Soil Sci.*, juillet 1945, 60, pp. 1-7.
 124. — GOLLAN (J. Jr), CODONI (M.-R.). — The application of controlled disper-sion to the textural grading of soils. *Soil Sci.*, juin 1943, 55, pp. 417-26.
 125. — GRAUVOGEL (Louis). — Contribution à l'étude du Grès à Voltzia. *C. R. somm. Soc. Géol. Fr.*, n° 3, 3 févr. 1947, p. 35.
 126. — GRIM (R.E.). — Petrology of Pennsylvanian shales and noncalcareous underclays associated with Illinois coals. *Bull. Amer. ceram. Soc.*, 1935, Vol. 14.
 127. — GRIM (R.-E.), BRAY (R.-H.). — The constitution of various ceramic clays. *Journ. Amer. ceram. Soc.*, 1936, vol. 19, pp. 307-315.
 128. — GRIM (R.-E.), CLARK (G.-L.), BRADLEY (W.-F.). — Note sur l'identi-fication de minéraux dans les argiles par diffraction de Rayons X. *Ztsch. f. Kristall.* Vol. 96, n° 4, avril 1937, p. 322.

129. — GRIM (R.-E.), BRAY (R.-H.), BRADLEY (W.-F.). — The mica in argillaceous sediments. *The Amer. Mineralogist*, vol. 22, n° 7, 1937, pp. 813-829.
130. — GRIM (R.-E.). — Modern concepts of clay materials. *Bull. geol. Soc. Amer.*, déc. 1941, 52, p. 2026.
140. — GRIM (R.-E.). — Modern concepts of clay materials. *Journ. Geol. Avr.-mai 1942*, 50, pp. 225-75.
150. — GRIM (R.-E.), ROWLAND (R.-A.). — Differential thermal analysis of clay minerals and other hydrous materials. *American Mineralogist*, nov. 1942, 27, pp. 746-61, et déc. 1942, 27, pp. 801-18.
151. — GRIM (R.-E.). — Relation of clay mineralogy to origin and recovery of petroleum. *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geologists*, août 1947, vol. 31, n° 8, pp. 1491-1499.
152. — GRIM (R.-E.). — Differential thermal curves of prepared mixtures of clay minerals. *Amer. Mineralogist*, sept.-oct. 1947, 32, pp. 493-501.
153. — GRIM (R.-E.), BRADLEY (W.-F.). — The illite clay minerals. *Internation. geol. Congr., Abstr.*, 1948, 18, pp. 302-8.
154. — GRIMSHAW (R.-W.), HEATON (E.), ROBERTS (A.-L.). — The constitution of refractory clays. II. Thermal-analysis methods. *Trans. brit. Ceram. Soc.*, juin 1945, 44, pp. 76-92.
155. — GRUNER (J.-W.). — La structure cristalline de la Kaolinite. *Zeitsch. für Kristallographie*, série A, vol. 83, 1932, pp. 75-88.
156. — GRUNER (J.-W.). — The structure of Vermiculites and their collapse by deshydration. *Amer. Mineralogist*, vol. XIX, 1934, pp. 557-75.
157. — GRUNER (J.-W.). — The structural relationship of glauconite and mica. *Amer. Mineralogist*, vol. 20, n° 10, 1935, pp. 699-714.
158. — GRUNER (J.-W.). — Notes on the structure of Serpentine. *Amer. Mineralogist*, vol. 22, n° 4, 1937, pp. 97-103.
159. — GRUNER (J.-W.). — Conditions for the formation of paragonite. *Amer. Mineralogist*, févr. 1942, 27, pp. 131-4.
160. — GUILLAUME (Louis). — Observations sur la stratigraphie du Trias lorrain. Forage de Saint-Clément (Meurthe-et-Moselle). *Extr. C. R. du 1^{er} Congrès lorrain des Soc. Savantes de l'Est. Nancy*, 6-8 juin 1938.
161. — GUILLAUME (Louis). — Forage profond de recherche d'eau potable à Dompierre (Vosges) et observations sur la constitution du Muschelkalk lorrain. *Bull. Soc. Sciences Nancy*, n° 2, févr.-mars 1939, pp. 48-56.
162. — GUILLAUME (L.). — Contribution à la stratigraphie et à la tectonique du Lias dans la région de Thionville. Le Fossé de Thionville. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. 11, 1941, pp. 35-73.
163. — HARDON (H.-J.), FAVERJEE (J.-Ch.-L.). — Qualitative X-ray analysis of the clay fraction of the principal soil types of Java. *Meded. Landbouwhogeschool*, 1939, 43, verh. 6, pp. 53-59.
164. — HARVEY (H.-W.). — Chimie et biologie de l'eau de mer. Presses universitaires de France, Paris, 1949.
165. — HARVEY (C.-O.). — Some notes on the calculation of molecular formulae for glauconite. *Amer. Mineralogist*, sept.-oct. 1943, 28, pp. 541-3.
166. — HAUG (E.). — *Traité de Géologie*. Paris, 1907.
167. — HAUSER (E.-A.). — Colloid chemistry of clays. *Chem. Review*, oct. 1945, 37, pp. 287-321.
168. — HENIN (S.). — Etude physico-chimique de la stabilité structurale des Terres. Ministère de l'Agriculture, Paris, 1938.
169. — HENIN (S.), TURC (L.). — Pectographie des argiles et des humates. *C. R. Ac. Sci.*, t. 223, 1946, pp. 683-4.
170. — HENIN (S.). — La formation des argiles et la Pédologie. *C. R. de la Conférence de Pédologie méditerranéenne. Ass. Franç. pour l'étude du sol*. Paris, 1947.
171. — HENIN (S.), DUPUIS (J.). — La pectographie, méthode nouvelle d'identification des Attapulgités. *Ann. Agron.*, sept.-oct. 1947, pp. 658-66.
172. — HENIN (S.). — Transformation des minéraux de la famille des Montmorillonites en phyllite à 10 A°. *Intern. geol. Congr., Abstr.* 1948, 18, p. 128.
173. — HENDRICKS (S.-B.), JEFFERSON (M.-E.). — Crystal structure of vermiculites and mixed vermiculites chlorites. *Amer. Mineralogist*, 1938, 23, pp. 851-862.
174. — HENDRICKS (S.-B.). — Relation of the lattice structure of clay minerals

- to some properties of clays. *Bull. geol. Soc. America*, déc. 1941, 52, p. 2026.
175. — HENDRICKS (S.-B.), ROSS (C.-S.). — Chemical composition and genesis of glauconite and celadonite. *Amer. Mineralogist*, déc. 1941, 26, pp. 683-748.
176. — HENDRICKS (S.-B.). — Lattice structure of clay minerals and some properties of clays. *Journ. Geol.*, avr.-mai 1942, 50, pp. 276-290.
177. — HEWETT (D.-F.). — *Journ. Wash. Acad. Sci.*, 1917, vol. 7, p. 196.
178. — HOFMANN (U.), JACOB (H.), LOOFMANN (A.). — 1941, *Bodenk. Pfl. Ern.* 25, pp. 257-271.
179. — HOSKING (J.-S.). — 1940, *J. Coun. Sci. Ind. Res. Australia*, 13, p. 205.
180. — HOUDARD (J.). — L'étage albien et sa faune aux environs de St-Dizier (Hte-Marne). *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. 9, 1939, pp. 625-636.
181. — HUMBERT (R.-P.), SHAW (B.). — Studies of clay particles with the electron microscope. I. Shapes of clay particles. *Soil Sci.*, déc. 1941, 52, pp. 481-7.
182. — HUTTON (C.-O.), SEELYE (F.-T.). — Composition and properties of some New-Zealand glauconites. *Amer. Mineralogist*, oct. 1941, 26, pp. 595-604.
183. — JACKSON (M.-L.), HELLMANN (N.-N.). — X-Ray diffraction procedure for positive differentiation of Montmorillonite from hydrous mica. *Proc. Soil Sci. Soc. Amer.*, 1941, 6, pp. 133-145.
184. — JACOB (A.), HOFMANN (U.), LOOFMANN (H.), MAEGDEFRAU (E.). — Chemische und röntgenographische Untersuchungen über die mineralische Sorptionssubstanz im Boden. *Beih. zur Angew. Chem. und Die Chem. Fabrik*, n° 21, 1935.
185. — JACQUOT (E.). — Description géologique et minéralogique du département de la Moselle. 1868, *Statist. gén. du Dép. de la Moselle*.
186. — JACQUEMIN (R.). — Détermination chimique de la fraction argileuse. Précision de la méthode. *Revue univ. Mines*, 15 oct. 1945, 1, pp. 162-70.
187. — JOHNSTONE (A.). — Quart. *Journ. Geol. Soc. Vol.* 45, p. 363, 1889.
188. — JOLY (H.). — Le Jurassique inférieur et moyen de la Bordure Nord-Est du Bassin de Paris. Thèse, Nancy, 1908.
189. — JOLY (H.), NINCK. — Un cas très particulier de désordres causés par les modifications épigénétiques de Roches liasiques (schistes à posidonies du Toarcien de Lorraine). *Congrès Intern. des Mines, Métall. Géologie Appliquée*, VII^e session, Paris, 20-26 oct. 1935, t. II, p. 529.
190. — JOLY (H.). — Etude sur les marnes à fossiles pyriteux du Callovien et de l'Oxfordien dans l'Est de la France. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 1914, 4^e série, t. 14, p. 411.
191. — JOLY (H.). — Résultats géologiques d'un forage profond à Rambervillères (Vosges). *Bull. Soc. Sciences Nancy*, nov. 1936, n° 9, pp. 193-5.
192. — KELLEY (W.-P.). — Modern clay researches in relation to agriculture. *J. Geol.*, avr.-mai 1942, 50, pp. 307-319.
193. — KELLEY (W.-P.). — Calculating formulas for fine grained minerals on the basis of chemical analysis. *Amer. Mineralogist*, janv.-fév. 1945, 30, pp. 1-26.
194. — KERR (P.-F.). — *American Mineralogist*, 22, 1937, p. 534.
195. — KERR (P.-F.). — Alteration studies. *Amer. Mineralogist*, mars-avr. 1947, 32, pp. 158-62.
196. — KORZHINSKY (D.-S.). — Liquid inclusions as the cause of imaginary petritization of feldspars. *C. R. Ac. Sci. URSS*, 1940, 29, n° 2, pp. 112-114.
197. — LACROIX (A.). — *Minéralogie de la France et de ses colonies*. T. I, Paris, 1893-1895, pp. 461-491.
198. — LANQUINE (A.). — Sur les relations entre la composition chimique, la structure microscopique et les qualités céramiques des argiles. *C. A. Ac. Sci.*, t. 169, 1919, p. 1171.
199. — LANQUINE (A.), CUVILLIER (J.). — Sur les faciès siliceux du Sparnacien dans l'Est et le Sud-Est du Bassin Parisien. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. 11, 1941, pp. 195-206.
200. — LAPADU-HARGUES (P.). — Sur l'existence et la nature de l'apport chimique dans certaines séries cristallophylliennes. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, 5^e série, t. 15, 1945, pp. 255-310.
201. — LAPADU-HARGUES (P.). — Remarques à propos des phénomènes chimiques liés au métamorphisme. *C. R. Ac. Sci.*, Paris, 1948, t. 226, n° 8, p. 685.

202. — LAPPARENT (A. de). — Le Pays de Bray. Mémoire du Service Carte géol. de la France, 1879.
203. — LAPPARENT (A.-F. de). — Excursions géologiques dans le Bassin de Paris. Les terrains tertiaires aux environs de Paris. Actualités scient. et industr. Hermann et Cie, Paris, 1942.
204. — LAPPARENT (J. de). — Etude comparative de quelques porphyroïdes françaises. Bull. Soc. Fr. de Minéralogie, t. 32, 1909, pp. 174-304.
205. — LAPPARENT (J. de). — Leçons de Pétrographie. Masson, éd., Paris, 1923.
206. — LAPPARENT (J. de). — Classification des argiles sédimentaires. C. R. Ac. Sci., t. 195, 1932, p. 257.
- 206 bis. — LAPPARENT (J. de). — Constitution et Origine de la Leverrière. C. R. Ac. Sci., t. 198, 1934, p. 669.
207. — LAPPARENT (J. de). — Sur un constituant essentiel des terres à foin. C. R. Ac. Sci., t. 201, 1935, p. 481.
208. — LAPPARENT (J. de). — Les milieux générateurs de la Montmorillonite et de la Sépiolite. C. A. Ac. Sci., Paris, 1936, t. 203, p. 553-555.
209. — LAPPARENT (J. de). — Connaissance des terres décolorantes. Rev. Chimie industrielle, n° 546, 1937.
210. — LAPPARENT (J. de). — Sur l'origine des Bentonites de l'Afrique du Nord. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1937, n° 10, pp. 126-128.
211. — LAPPARENT (J. de). — Les argiles d'El Goléa (Sahara algérien). Etude pétrographique. Bull. Serv. Carte géol. Algérie, 5^e série, n° 3, 1937.
212. — LAPPARENT (J. de). — Structure et origine des terres naturelles susceptibles d'être utilisées pour la décoloration des huiles minérales. C. R. II^e Congrès mondial du Pétrole, Paris, juin 1937.
213. — LAPPARENT (J. de). — Formules structurales et classification des argiles. Zeit. Krist., 1937, B. 98, pp. 233-258.
214. — LAPPARENT (J. de). — Défense de l'Attapulgit. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. LXI, 1938.
215. — LAPPARENT (J. de). — Logique des minéraux du granite. La Revue Scientifique, 1941, pp. 285-292.
216. — LAPPARENT (J. de). — Spécification des argiles du sidérolithique subordonnées à la formation des sables du Périgord en Dordogne. C. R. Ac. Sci., Paris, 1941, t. 213, pp. 111-114.
217. — LAPPARENT (J. de). — L'épisode du dépôt des argiles smectiques de l'Afrique du Nord. C. R. Ac. Sci., Paris, 1945, t. 221, pp. 335-337.
218. — LAPPARENT (J. de). — Le Côté des Péridotites. Revue Scientifique, 1946, fasc. 6, pp. 334-342.
219. — LAPPARENT (J. de). — Sur la Séricite. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1947, n° 16, p. 349.
220. — LARSEN (E.-S.), BERMAN (H.). — The microscopic determination of the nonopaque minerals. U. S. Geol. Survey Bull. 848, 2^e éd. Washington, 1934.
221. — LAUNAY (L. de). — Gîtes minéraux et métallifères. Paris, 1913, t. I, p. 801.
222. — LAVEZARD. — Contribution à l'étude des argiles de France. Contribution à l'étude des argiles et de la céramique. Paris, 1906.
223. — LAVILLE (A.). — Etude géologique sur les gisements des argiles de France. Contribution à l'étude des argiles et de la Céramique. Paris, 1906.
224. — LAVOLLAY (J.). — Les constituants colloïdaux des terres arables. Le complexe argilo-humique et les phénomènes d'échanges d'ions. Act. Scient. et Industr., Hermann et Cie, n° 940, 1943.
225. — LEBRUN (F.). — Note sur les Grès qui séparent le Lias du Keuper. Bull. Soc. Géol. Fr., 2^e série, t. IX, 1852.
226. — LE CHATELIER (H.). — Sur la constitution des argiles. Bull. Soc. Chimique, t. XLVIII, p. 116, 1887.
227. — LE CHATELIER (H.). — De l'action de la chaleur sur les Argiles. Bull. Soc. Franç. Minér., t. X, 1887, p. 204.
228. — LE CHATELIER (H.). — Constitution des calcaires marneux. C. R. Ac. Sci., t. 118, 1894, p. 262.
229. — LE CHATELIER (H.), SALADIN. — Revue de Métall., t. I, 1901, p. 134; t. IX, 1912, p. 136.
230. — LE CHATELIER (H.). — La Silice et les Silicates. Paris, Hermann, 1914.
231. — LEGENDRE. — La concentration en ions hydrogène. Le pH de l'eau de

- mer. Presses universitaires, Paris, 1929.
232. — LEGENDRE. — Estimation rapide du Mg dans l'eau de mer. C. R. Séances Soc. de Biologie, Paris, mars 1942, t. CXXXVI, n° 5, 6, pp. 291-2.
233. — LEMOINE (P.). — Géologie du Bassin de Paris. Paris, Hermann, 1911.
234. — LEVALLOIS (J.). — Mémoire sur le gisement de sel gemme dans le département de la Moselle et sur la composition générale du Muschelkalk en Lorraine. Mémoire de la Sté Royale de Nancy, et Annales des Mines, 4^e série, t. XI, 1846-1847.
235. — LEVALLOIS (J.). — Aperçu géologique du Département de la Meurthe. Ann. Min., 1851, 4^e série, t. XIX, p. 18.
236. — LEVALLOIS (J.). — Les couches de jonction du Trias et du Lias en Lorraine. 1854.
237. — LEVALLOIS (J.). — Remarques sur les relations du parallélisme que présentent dans la Lorraine et dans la Souabe les couches du terrain dit Marnes irisées ou Keuper. Nancy, 1869.
238. — LINDGREN (W.). — Mineral Deposits. McGraw-Hill, New-York, 1933.
239. — LONGCHAMBON (H.), MOURGUES (F.). — Sur le gisement de magnésite de Salinelles (Gard). Bull. Soc. Minéralogie, 1927, t. 50, pp. 66-74.
240. — LONGCHAMBON (H.). — Sur les propriétés caractéristiques des Palygorskites. C. R. Ac. Sci., Paris, 1936, t. 203, p. 672.
241. — LONGCHAMBON (H.). — Les courbes de déshydratation des minéraux. Bull. Soc. Minéralogie, t. LIX, 1936.
242. — LONGCHAMBON (H.). — Sur certaines caractéristiques de la Sépiolite d'Ampandandrava et la formule des Sépiolites. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, 1937, t. LX, pp. 232-276.
243. — LONGCHAMBON (H.). — Les constituants minéralogiques des argiles. Recueil de communications du Congrès technique de l'industrie céramique, 1938.
244. — LONGCHAMBON (L.), ZAJTMANN (J.). — Sur les propriétés colloïdales des argiles réfractaires. Recueil des Communications du Congrès Technique de l'Industrie céramique, 1938.
245. — LONGCHAMBON (L.), ZAJTMANN (J.). — Recherches sur les propriétés physicochimiques des argiles kaoliniques. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. 62, 1939, pp. 5-88.
246. — LONGCHAMBON (M.). — Sur le rôle de la magnésie dans les cycles sédimentaires. C. R. Ac. Sci., t. 158, 1914, p. 267.
247. — LONGUET (Jacqueline). — Sur un aluminat de nickel hydraté. C. R. Ac. Sci., t. 226, 16 février 1948, p. 579.
248. — LOVERING (T.-S.). — Sericite-Kaolin alteration as a guide to ore. Econ. Geology, Sept.-oct. 1947, vol. 42, p. 534.
- 248 bis. — LOVERING (T.-S.). — Les minerais de Tungstène du Comté de Boulder. Economic Geology, vol. 36, n° 3, mai 1941.
249. — LUCAS (Gabriel). — La sédimentation calcaire. Action du carbonate de sodium sur l'eau de mer. C. R. Ac. Sci., t. 226, 1948, p. 937.
250. — LUCAS (Gabriel). — La sédimentation calcaire. Quelques modalités de l'alcalinisation de l'eau de mer en présence d'ions carboniques. C. R. Ac. Sci., t. 226, 1948, p. 1023.
251. — MacEWAN (D.-M.-C.). — Identification of the montmorillonite group of minerals by X. Rays. Nature, nov. 1944, 154, pp. 577-578.
252. — MacEWAN (D.-M.-C.). — The identification and estimation of the montmorillonite group of minerals, with special reference to soil clays. J. Soc. chem. Industr., oct. 1946, 65, pp. 298-304.
253. — MacEWAN (D.-M.-C.). — Les Minéraux argileux de quelques sols écossais. Verre et Silicates industriels, t. XIII, n° 1, 1948, pp. 41-46.
254. — MacEWAN (D.-M.-C.). — Complexes of clays with organic compounds. I. Complex formation between montmorillonite and halloysite and certain organic liquids. Trans. of the Faraday Soc., n° 306, vol. XLIV, part. 6, June 1948.
255. — MacMURCHY. — The crystal structure of the chlorite minerals. Zeitsch. f. Kristall., 1934, Bd 88, Heft 5-6, pp. 421-432.
256. — MAEGDEFRAU (E.), HOFMANN (U.). — Glimmerartige Mineralien als Tonsubstanzen. Z. Krist. (A) 98, 1937, pp. 31-59.
259. — MAIKOVSKY (V.). — Contribution à l'étude paléontologique et stratigra-

- phique du Bassin potassique d'Alsace. Mémoire n° 6, Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, 1941, 192 p.
260. — MALLARD (E.). — Sur la Bravaisite. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. I, 1878, p. 5.
261. — MARLIERE (René). — Wealdien du Hainaut. Description géologique des argiles en exploitation. Rapport annuel du COBEA, 1944-45, 24 p.
262. — MARLIERE (René). — Deltas wealdiens du Hainaut. Sables et graviers de Thien; argiles réfractaires d'Hautrage. Bull. Soc. belge Géol. Paléont. Hydrol., t. LV, fasc. I, 1946, pp. 69-101.
263. — MARLIERE (René). — Les argiles réfractaires d'âge wealdien du Hainaut. Verre et Silicates industriels, t. XII, n° 9, 1947, p. 32.
264. — MARSHALL (C.-E.). — Mineralogical methods for the study of salts and clays. Zeitsch. Kristall. Mineral. und Petrogr., t. 90, 1935, p. 8.
265. — MARSHALL (C.-E.), HUMBERT (R.-P.), SHAW (B.-T.), CALDWELL (O.-G.). — Studies of clay particles with the electron microscope. II. The fractionation of beidellite, nontronite, magnesium bentonite and attapulgite. Soil Sci., août 1942, 54, pp. 149-58.
266. — MATHIEU et ses collaborateurs. — Mémorial des Services chimiques de l'Etat. Paris, 1945.
267. — MATHIEU-SICAUD (A.), LEVASSEUR (G.). — Action des ultrasons sur les suspensions aqueuses de sulfate de baryum. C.R. Ac. Sci., Paris, 1948, t. 227, pp. 196-7.
268. — MATHIEU-SICAUD (A.), LEVASSEUR (G.). — Dispersion des suspensions argileuses aux ultrasons. Interprétation des résultats au microscope électronique. C. R. Ac. Sci., Paris, 1949, t. 228, pp. 393-395.
269. — MATTSON (S.), ANTIPOW-KARATAJEV. — Les Colloïdes des sols et les méthodes de leur étude. Leningrad, 1930.
270. — MATTSON (S.). — The electrokinetic and chemical behavior of colloidal material. Journ. Phys. Chemie, 1928, 32, pp. 1532-1552.
271. — MATTSON (Sante). — The laws of soil colloidal behavior. IV. Isoelectric precipitates. Soil Sci., vol XXXI, Jan.-June 1931.
272. — MATTSON (S.), HESTER (J.-B.). — The laws of soil colloidal behavior. Soil Sci., 1935, 39, pp. 75-84.
273. — MAUBEUGE (P.). — La base du Toarcien aux environs de Nancy. Bull. Soc. Sciences Nancy, 1945, n° 3, p. 4.
274. — MAUBEUGE (P.). — Sur un nouvel horizon paléontologique du Lias supérieur et le contact du Lias moyen et supérieur dans l'Est de la France. Bull. Soc. Géol. Fr., t. 18, 1948, pp. 59-68.
275. — MAUBEUGE (P.). — Le Lotharingien en Lorraine centrale. C. R. Ac. Sci., t. 228, 1949, p. 411.
276. — MAUBEUGE (P.). — La limite du Trias et du Jurassique en Lorraine. Bull. Soc. Sci. de Nancy, 1949, n° 4, p. 75.
277. — MAUBEUGE (P.). — A propos de la géologie du Vermois. Observations sur une note de MM. P. Coudert et G. Mathieu. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 1949, pp. 229-230.
278. — MAUGUIN (C.). — Etude des Micas au moyen des Rayons X. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. LI, 1928, pp. 285-332.
279. — MAUGUIN (C.). — La maille cristalline des Chlorites. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. LIII, 1930, pp. 279-300.
280. — MERING (J.). — On the Hydration of Montmorillonite. Trans. of the Faraday Soc., 1946, vol. XLII B, pp. 205-219.
281. — MEURICE (R.). — Les divers modes d'altération des principaux minéraux par les agents naturels. Bull. Inst. Agron. Gembloux, 1941, 10, n° 1-4, pp. 11-25.
282. — MEYER (C.). — Notes on the cutting and polishing of thin sections. Economic Geology, t. 41, 1946, n° 2, pp. 166-172.
283. — MEYER (L.). — Etude stratigraphique du terrain oligocène de Haute-Alsace et du Territoire de Belfort. Bull. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, t. I, fasc. 3, pp. 153-262.
284. — MICHAUD (R.). — Sur l'absence de la raie de grand espacement dans les diagrammes aux Rayons X des fractions argileuses des sols. C. R. Ac. Sci., Paris, 3 janv. 1945, t. 220, pp. 53-4.
285. — MICHAUD (R.). — Sur la différenciation de l'illite et de l'attapulgite dans

- les diagrammes X des fractions argileuses des sols. CNRS, Centre de Recherches Ind. et Marit. de Marseille, note 154, 10 déc. 1947.
286. — MICHAUD (R.). — La différenciation de l'illite et de l'attapulgite sur les diagrammes aux Rayons X des fractions argileuses des sols. C. R. Ac. Sci., Paris, 1948, t. 226, p. 346.
- 286 bis. — MICHEL (R.). — Etude géologique du Plateau de Gergovie. Revue Sci. Nat. Auvergne, 1948, vol. 14, fasc. I.
287. — MIGEON (G.). — Contribution à l'étude de la définition des Sépiolites. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. LIX, 1936, pp. 6-8.
288. — MILLOT (Georges). — Note préliminaire sur les argiles et marnes de Lorraine. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 4 févr. 1946, n° 3.
289. — MILLOT (G.). — La nature et la genèse des minéraux argileux d'une série sédimentaire secondaire. Verre et Silicates industriels, t. XIII, n° 10, déc. 1948.
290. — MILLOT (G.), NOISETTE (G.). — Essai de dispersion des Roches argileuses par les ultrasons. C. A. Ac. Sci., 3 nov. 1948, t. 227, pp. 974-6.
291. — MINOUX (G.). — Le Trias et le Lias des environs de Mirecourt (Vosges). Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 4, 1934, pp. 17-34.
292. — MINOUX (G.), RICOUR (J.). — Découverte de fossiles dans la Dolomie-moellon du Keuper moyen des environs de Mirecourt (Vosges). Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 16, 1946, pp. 445-450.
293. — MORET (M.). — Contribution à l'étude du dosage du Magnesium dans les roches. Diplôme d'Etudes Sup., Nancy, 1945.
294. — MOREY (G.-W.), INGERSON (E.). — The pneumolytic and hydrothermal alteration and synthesis of silicates. Econ. Geology, suppl. n° 5, août 1937, pp. 607-761.
295. — MUNIER-CHALMAS. — L'anticlinal de Beynes et le Dôme de la Mauldre. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 1892, t. XX, p. LXXI.
296. — MUNIER (P.), RIVIERE (A.). — Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique. Fasc. I, Centre Nat. d'Etudes et Recherches céramiques, Paris, 1946.
297. — MUNIER (P.), RIVIERE (A.). — Contribution à l'étude des argiles utilisées en céramique. Fasc. II, Inst. de Céramique Franç., Paris, 1948.
298. — NAGELSCHMIDT (G.). — On the lattice shrinkage and structure of montmorillonite. Zeits. Krist., 1936, 93, pp. 481-487.
299. — NAGELSCHMIDT (G.). — X-Rays investigations on clays. Part III. The differentiation of micas by X-Ray powder photographs. Zeitsch. f. Kristall., 1937, n° 97, p. 514.
300. — NAGELSCHMIDT (G.). — On the atomic arrangement and variability of the members of the montmorillonite group. Miner. Mag. London, 1938, Vol. XXV, n° 162, pp. 140-155.
301. — NAGELSCHMIDT (G.), DESAI (A.-D.), MUIR (A.). — Journ. Agric. Sciences, 1940, 30, p. 639.
302. — NAGELSCHMIDT (G.), HICKS (D.). — The mica of certain coal-measure shales in South Wales. Miner. Mag., 26, mars 1943, pp. 297-303.
303. — NAGELSCHMIDT (G.). — The identification of clay minerals by means of aggregate X-Ray diffraction diagrams. J. Sci. Instrum., mai 1944, 18, pp. 100-1.
304. — NAGELSCHMIDT (G.). — Rod shaped clay particles. Nature, 142, 1938, pp. 113-114.
305. — NAGELSCHMIDT (G.). — The mineralogy of soil colloids. Bureau of Soil Science, Harpenden, 1944.
306. — NAGELSCHMIDT (G.). — X-Ray diffraction experiments on illite and bravaisite. Miner. Magaz., London, déc. 1944, vol. XXVII, n° 187, pp. 59-61.
307. — NICKLES (R.). — Sur le Callovien de la Woëvre. C. A. Ac. Sci. Paris, 24 janvier 1898.
308. — NICKLES (R.). — Etudes géologiques sur la Woëvre. Callovien. Bull. Soc. Sciences de Nancy, 1899.
309. — NICKLES (R.). — Sur le Kiméridgien supérieur de la Meuse. Bull. Serv. Carte géol. Fr., 1912, C. R. Collaborateurs, p. 88.
310. — NICKLES (R.). — Le contact du Rhétien et de l'Hellangien en Meurthe-et-Moselle. Bull. Soc. Sciences de Nancy, t. 15, fasc. I, 1914.
311. — NOLL (W.). — Über die geochemische Rolle der Sorption. Chemie der Erde, 1931, 6, p. 552.

312. — NOLL (W.). — Über die Bildungsbedingungen von Kaolin, Montmorillonit, Pyrophyllit und Analcim. Min. Petr. Mitteil. 48, 1936, pp. 240-247.
313. — NOLL (W.). — Mineralbildung im system $Al_2O_3Si_2O_5H_2O$. Neues Jahrb. Min. Geol. Beil., 1935, Bd 70, pp. 65-115.
314. — NOLL (W.). — Synthese von Montmorilloniten. Chemie der Erde, 1936, t. 10, p. 130.
315. — NORTON (F.-H.). — Hydrothermal formation of clay minerals in the laboratory. Part. I. Amer. Mineralogist, 24, 1939, pp. 1-17; Part II. Amer. Mineralogist, 26, 1941, pp. 1-17.
316. O'NEILL (Th.-F.). — The hydrothermal alteration of feldspars at 250° to 400° C. Economic Geology. Vol. XLIII, May 1948, n° 3, pp. 167-180.
317. — ORBIGNY (A. d'). — Paléontologie française. Terrains jurassiques. Céphalopodes. Paris, 1842-49.
318. — ORCEL (J.). — Recherches sur la composition chimique des chlorites. Bull. Soc. Franç. de Minéralogie, t. 50, 1927, pp. 75-126.
319. — ORCEL (J.), CAILLIERE (S.). — Analyse thermique différentielle des argiles à Montmorillonite. C. R. Ac. Sci., t. 197, 1933, pp. 774-776.
320. — ORCEL (J.). — L'emploi de l'analyse thermique différentielle dans la détermination des constituants des argiles, des latérites et des bauxites. 7^e Congrès intern. Mines, Métall., Géol. appliquée, Paris, 1935, Sect. Géol. appl., t. I, p. 359.
321. — PAULING (L.). — The structure of the Chlorites. Proc. Nat. Acad. Sci., 1930, vol. XVI, p. 578.
322. — PAULING (L.). — The structure of the micas and related minerals. Proc. Nat. Acad. Sci., 16, 1930, pp. 123-129.
323. — QUIEVREUX (F.). — Esquisse du monde vivant sur les rives de la lagune potassique. Bull. Soc. Ind. Mulhouse, 1933.
324. — QUENSTEDT (F.-A.). — Die Ammoniten des Schwäbischen Jura. Stuttgart, 1883-88.
325. — RAGUIN (E.). — Géologie des Gîtes minéraux. Masson, éd., Paris, 1940.
326. — RENGAUD (E.). — Analyse thermique différentielle et métallographie microscopique. Paris, 1909, 172 p.
327. — RICOUR (J.). — Analogie entre le gisement de houille de Vescagne (Alpes-Maritimes) et les gisements keupériens de Lorraine et de Franche-Comté. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1946, n° 12, pp. 235-8.
328. — RIVIERE (A.). — Sur la dolomitisation des sédiments calcaires. C. R. Ac. Sci., t. 209, p. 691, Paris, 1929.
329. — RIVIERE (A.). — Sur les méthodes granulométriques de sédimentation. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 14, 1944, pp. 409-37.
330. — RIVIERE (A.). — Contribution à l'étude des sédiments argileux. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 16, 1946, pp. 43-55.
- 330 bis. — RIVIERE (A.). — Sur l'identité structurale des Illites et de la Bravaisite de Noyant (Allier). C. R. Ac. Sci., t. 223, n° 2, 1946, p. 95.
331. — RIVIERE (A.). — Méthode simplifiée de diagnose roentgénographique des argiles. Application à l'étude des bravaissites (Illites). Leur évolution géologique. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 16, 1946, pp. 463-469.
332. — RIVIERE (A.). — Sur les Illites et les argiles bravaissitiques. Verre et Silicates industr., 1948, n° 4, p. 47.
333. — RIVIERE (A.), MUNIER (P.). — Essai de classification minéralogique des terres et argiles céramiques. C. R. Ac. Sci., Paris, 1948, t. 226, n° 2, p. 1628.
334. — ROBINSON (G.-W.). — Soils. Their origin, constitution and classification. 2^e édit. 1936.
335. — ROMAN (F.). — Etude de bassins lacustres de l'éocène et de l'oligocène du Languedoc. Bull. Soc. Géol. Fr., 4^e série, t. 3, 1903, pp. 546-616.
336. — ROSENBUSCH. — Elemente der Gesteinslehre. Stuttgart, 1923.
337. — ROSS (C.-S.), KERR (P.-F.). — The kaolin minerals. U. S. Geol. Survey Prof. Paper 165 E. 1934, pp. 151-180.
338. — ROSS (C.-S.), KERR (P.-F.). — The clay minerals and their identity. Journ. Sedim. Petr., 1931, t. 1, p. 59.
339. — ROSS (C.-S.), HENDRICKS (S.-B.). — Clay minerals of the montmorillonite group. Their chemical and mineral relationships and the factors controlling base exchange. Proc. Soil Sci. Soc. America, 1941, 6, pp. 58-62.

340. — ROSS (C.-S.), HENDRICKS (S.-B.). — Minerals of the montmorillonite group. U. S. Geol. Survey, Prof. Paper 205 B, 1943-44.
341. — ROSS (C.-S.). — Minerals and mineral relationships of the clay minerals. J. Amer. Ceram. Soc. Juillet 1945, 28, pp. 173-83.
342. — ROY (C.-J.). — Silica in natural waters. Amer. Journ. Sci., juill. 1945, 243, pp. 393-403.
343. — RUTHRUFF (R.-F.). — Vermiculite and hydrobiotite. Amer. Mineralogist, août 1941, 26, pp. 478-84.
344. — SHIMPER, MOUGEOT. — Monographie des plantes fossiles du Grès bigarré de la chaîne des Vosges. Leipzig, 1844.
345. — SCHNAEBELE (R.). — Monographie géologique du champ pétrolifère de Pechelbronn. Mémoire n° 7. Serv. Carte géol. Alsace-Lorraine, 1948, 253 p.
346. — SCHOELLER (H.). — Etude sur le sidérolithique du Lot et du Lot-et-Garonne. Bull. Serv. Carte géol. Fr., n° 206, t. XLIII, 1941, pp. 1-20.
347. — SCHOELLER (H.). — Les conditions de formation des mollasses et du sidérolithique de la Bordure Nord-Est du Bassin d'Aquitaine. C. R. somm. Soc. Géol. Franç. 1941, pp. 32-4.
348. — SHUKRI (N.-M.). — The use of pH values in determining the environment of deposition of some liassic clays and shales. Bull. Fac. Sci., n° 24, Le Caire, 1941.
349. — SONDER (R.-A.). — Profondeur marine et faciès lithologique. Eclogae geol. Helvetiae, 1946, 39, n° 2, pp. 260-263.
350. — SOYER (R.). — Coupe géologique de Cormeilles-en-Parisis (S.-et-O.). Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 9, 1939, pp. 653-672.
351. — STEVENS (R.-E.). — Geological Survey. Bull. 950, p. 101, 1942-1945.
352. — SUTRA (Geneviève). — Sur la dimension des ions électrolytiques. Journ. Chimie Physique, nov. et déc. 1946, pp. 190-216 et 279-326.
353. — SUTRA (Geneviève). — Nature et dimensions des ions en solution aqueuse à haute température. C. R. Ac. Sci., Paris, 1946, t. 223, n° 17, p. 629.
354. — SUTRA (G.). — Résultats récents concernant la constitution des ions électrolytiques. Revue Gén. des Sc. pures et appliquées, n° 3-4, 1949, pp. 54-64.
355. — TAMM. — Medd. f. stat. Skogsförs. 1922, 19, pp. 387-404.
356. — TERCIER (J.). — Dépôts marins actuels et séries géologiques. Eclog. geol. Helvetiae, 1939, vol. 32, n° 1.
357. — TERQUEM et PIETTE. — Le Lias inférieur de l'Est de la France. Mémoire Soc. Géol. Fr., 2^e série, t. VIII, 1865.
358. — TERQUEM (O.), BERTHELIN. — Etude microscopique des marnes du Lias moyen d'Essey-les-Nancy. Mémoire Soc. Géol. Fr., 2^e série, t. X, 1875.
359. — THAHLA. — Electrodialysis of mineral silicates : an experimental study of rock-weathering. Miner. Mag., déc. 1945, 27, pp. 137-45.
360. — THEOBALD (N.). — Répartition des faciès de l'oligocène inférieur dans le fossé rhénan. C. R. Ac. Sci., 1949, t. 228, p. 410.
361. — THIEBAUT (L.). — Sur la composition minéralogique de quelques marnes. Bull. Soc. Sci. Nancy, 1923, p. 55.
362. — THIEBAUT (L.). — Contribution à l'étude des sédiments argilo-calcaires du Bassin de Paris. Thèse, Nancy, 1925.
363. — THOMAS (H.). — Contribution à la géologie des environs de Provins. Bull. Soc. Géol. Fr., 3^e série, t. 28, 1900, pp. 72-85.
364. — THOMPSON (J.-B. jr.). — Role of aluminium in the rock-forming silicates. Abstr. in Bull. geol. Soc. America, Déc. Meeting in Ottawa, 1947, vol. 58, n° 12, part 2, p. 1232.
365. — TOMLINSON (W.-H.), MEIER (A.-E.). — On the origin of montmorillonite. Amer. Mineralogist, 1937, vol. 22, n° 11, pp. 1124-28.
366. — TRUOG (E.) and al. — Proc. Soil Sci. Soc. America, 1937, t. pp. 104-12.
367. — TWENHOFEL (W.-H.). — Principles of Sedimentation. McGraw-Hill, New-York and London, 1939.
368. — URBAIN (P.). — Les sciences géologiques et la notion d'état colloïdal. Act. Scient. et Industr., n° 69, Hermann et Cie, Paris, 1933.
369. — URBAIN (P.). — L'action géochimique de l'eau sur les roches. Revue Géogr. Phys. et Géol. Dynam. 1934, pp. 223-237.
370. — URBAIN (P.). — Séparation de divers constituants des marnes. C. R. Ac. Sci., 1935, t. 201, p. 92.

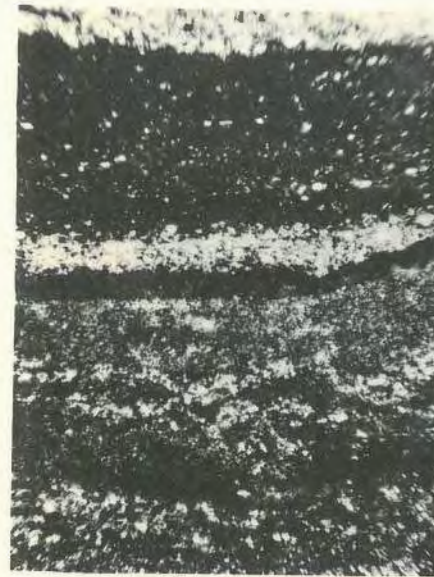
371. — URBAIN (P.). — Classification des silicates d'alumine hydratés (lato sensu), du point de vue du pétrographe et du géologue. C. R. somm. Soc. Géol. Fr., 1936, pp. 147-149.
372. — URBAIN (P.). — Etude pétrographique des principaux termes plastiques de la série liaso-jurassique du Calvados. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1937, pp. 24-26.
373. — URBAIN (P.). — Texture microscopique des roches argileuses. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 7, 1937, pp. 341-352.
374. — URBAIN (P.). — Introduction à l'étude pétrographique et géochimique des roches argileuses. Méthodes chimiques, microscopiques, thermiques, roentgenographiques, mécaniques. Actualités Sci. et Indust. n° 499 et 500. Hermann et Cie, Paris, 1937.
375. — URBAIN (P.). — Sur quelques particularités minéralogiques des argiles smectiques du bassin pliocène de la Moulouya (Maroc). C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1941, p. 17.
376. — URBAIN (P.). — Logique des roches argileuses. Bull. Soc. Géol. Fr., 5^e série, t. 12, 1942, pp. 97-112.
377. — VAN WERVECKE (L.). — Profile durch den Mittleren Muschelkalk aus Bohrungen im nordöstlichen Frankreich, in Luxemburg Lothringen und im Rheintal. Mitt. der geol. Landesanstalt von Els. Loth., Bd X, 1916, pp. 335-365.
378. — VATAN (A.), KRAUT (F.). — Sur l'origine des roches argileuses des environs de Confolens (Charente) attribuée au sidérolithique. C. R. Ac. Sci., 1938, t. 206, p. 143.
379. — VATAN (A.). — Observations: 1° Sur l'existence dans certaines argiles de sels alcalins solubles. 2° Sur la structure des sables à ciment argileux. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 1939, pp. 144-146.
380. — VATAN (A.). — La sédimentation détritique en Aquitaine aux temps tertiaires. C. R. Somm. Soc. Géol. Fr., 2 févr. 1948, p. 48.
381. — VENTRIGLIA (U.). — Contribuzione alla conoscenza delle argille dal punto di vista petrografico, genetico ed applicativo. Ric. Sci. Ricostit., Dec. 1947, 17, pp. 2027-30.
382. — VERNADSKY (W.). — La Géochimie. Alcan, éd., Paris, 1924.
383. — VOGT (G.). — De la composition des argiles et des kaolins. C. R. Ac. Sci., t. 110, 1890, p. 1199.
384. — VOGT (G.). — De la composition des argiles. Contribution à l'étude des argiles et de la céramique. Paris, 1906.
385. — VOLK (N.-J.). — Formation of muscovite in soils. Amer. Journ. of Science, t. 26, 1933, pp. 114-129.
386. — WALLACH. — Analyse thermique des argiles. C. R. Ac. Sci., t. 157, 1913, p. 48.
387. — WARREN (B.-E.). — X-ray study of chrysotile Asbestos. Amer. Mineralogist, Vol. 27, n° 3, 1942, p. 235.
388. — WERRY (E.-T.). — Journ. Wash. Acad. Sc., 1917, vol. 7, p. 576.
- 388 bis. — WINCHELL (A.-N.). — Studies in the mica group Amer. Journ. of Sc. 1925, 9, pp. 309-327 et 415-430.
389. — WINCHELL (A.-N.). — Montmorillonite. Amer. Mineralogist, juill.-août 1945, 30, pp. 510-8.
- 389 bis. — WHITE (J.-L.), JACKSON (M.-L.). — Glycerol solvation of soil clay for X-ray diffraction analysis. Soil Sc. Soc. of Amer. Proceedings, 1946, pp. 150-154.
390. — WINKLER. — Les Argiles et leurs propriétés. Une interprétation. Research, 1944, vol. 2, n° 4, pp. 175-183.
391. — WOHLGEMUTH (J.). — Contact du Bathonien et du Callovien sur la bordure Est du Bassin de Paris. Bull. Soc. Géol. Fr., 1881, vol. IX, p. 258.
392. — WOHLGEMUTH (J.). — Note sur le Callovien de la voie ferrée de Neufchâteau à Toul. Bull. Soc. Sciences de Nancy, 1890, vol. XI, p. 50.
393. — WOHLGEMUTH (J.). — Recherches sur le Jurassique moyen de l'Est du Bassin de Paris. Thèse, Paris, 1883.
394. — WULFING. — Untersuchung des bunten Mergels der Keuperformation auf seine chemischen und mineralogischen Bestandteile. Jahr. Ver. Vater. Natur. Württemberg, t. 56, 1900, p. 22.

PLANCHES



PLANCHE I

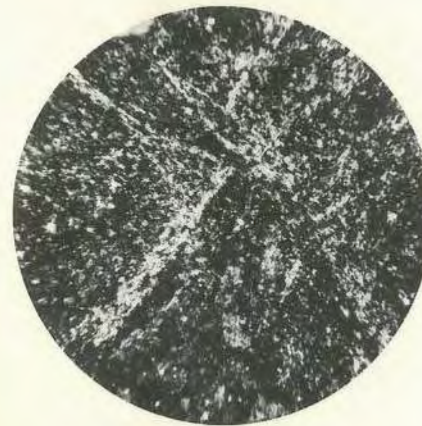
- FIG. 1. — DEYVILLERS rouge (Vosges). Muschelkalk. N° 25. Texture cyclique perpendiculaire à la sédimentation. Alternance de zones plus ou moins détritiques (Lumière naturelle. $\times 33$).
- FIG. 2. — SOMMANCOURT (Haute-Marne). Barrémien. N° 47. Texture en traînées (Nicols croisés. $\times 33$).
- FIG. 3. — GERGOVIE (Puy-de-Dôme). Burdigalien. N° 61. Texture floconneuse type. Des cristallisations très ténues de calcite limitent les « flocons » phylliteux. Cette texture est très fréquente dans les roches sédimentaires (Nicols croisés. $\times 110$).
- FIG. 4. — HEMING (Moselle). Muschelkalk. N° 2. Rhomboèdres de calcite dans une marne (Nicols croisés. $\times 110$).



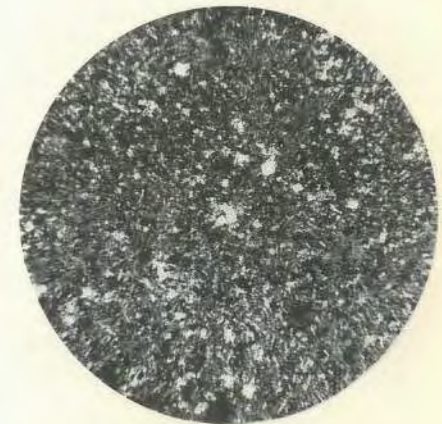
1



3



2



4

PLANCHE II

FIG. 1. — MOESLAINS (Haute-Marne). Albien. N° 21. Grains de Glauconie dans une marne noire (Lumière naturelle. $\times 110$).

FIG. 2. — PECHELBRONN (Bas-Rhin). Sannoisien. N° 39. Grains de Glauconie dans une marne rubannée (Lumière naturelle. $\times 110$).

FIG. 3. — JEANDELAINCOURT (M.-et-M.). Charmouthien. N° 9. Débris d'organismes dans un calcaire argileux (Lumière naturelle. $\times 33$).

FIG. 4. — Massif du CHAMP DU FEU (Bas-Rhin). Feldspath zoné dont le cœur seul est altéré. La partie centrale apparaît noire et saupoudrée de séricite. Le pourtour clair et dépourvu de phyllites (Nicols croisés. $\times 33$).

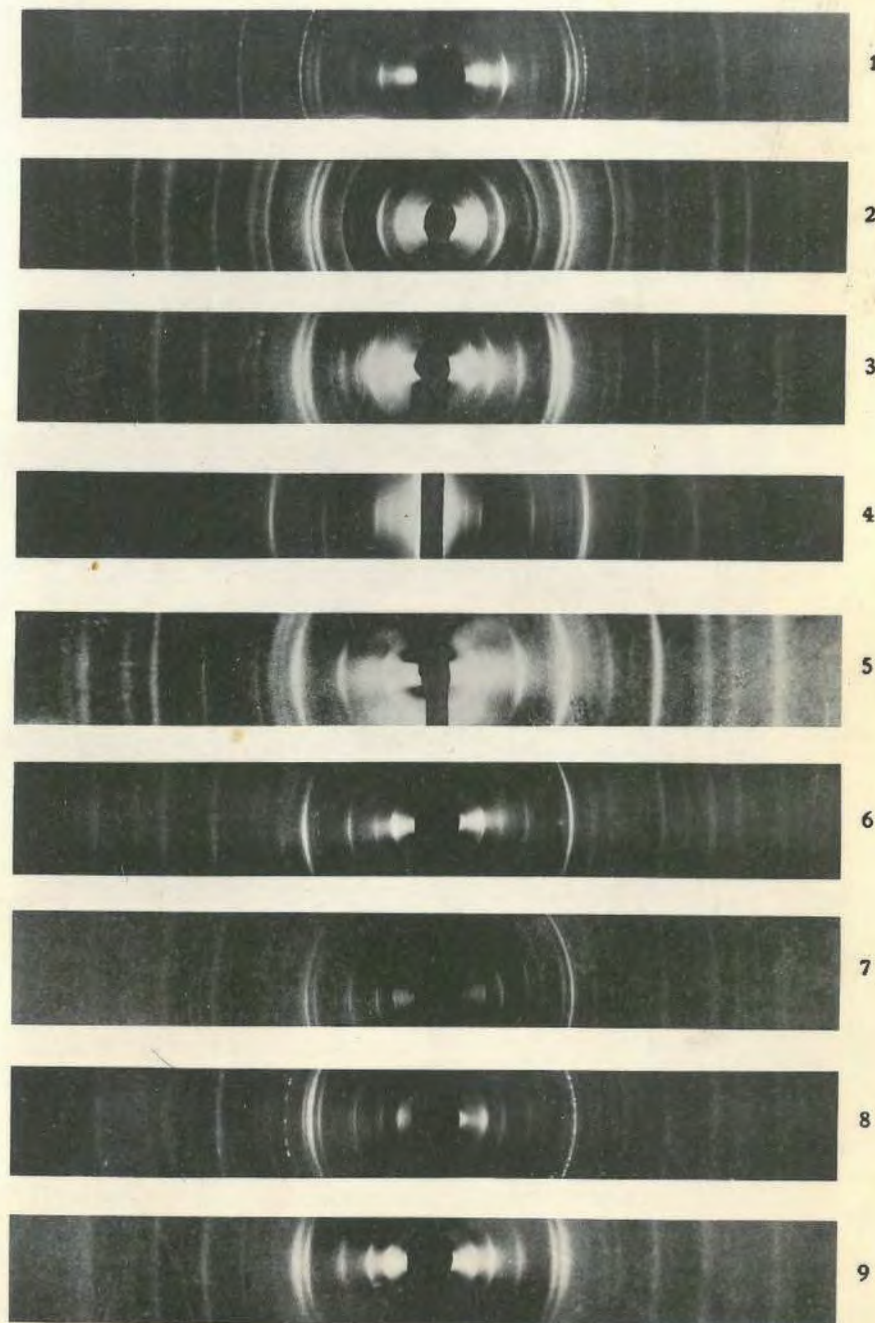


PLANCHE V

ROCHES MARINES (Suite).

- FIG. 1. — SENONCHES (E.-et-L.). Turonien. N° 22. Craie. Raie intense à 15. Montmorillonite. Nombreuses impuretés.
- FIG. 2. — SENONCHES. Phase argileuse mieux purifiée et traitée au glycérol. La raie à 15 passe à 17 et les raies de la montmorillonite glycérolée apparaissent.
- FIG. 3. — MOESLAINS (Haute-Marne). Albien inférieur. N° 20. Grès glauconieux. Spectre de la glauconie.

ROCHES LAGUNAIRES SALÉES OU SURSALÉES.

- FIG. 4. — HOUSSEAS vert (Vosges). Muschelkalk moyen. N° 27. Illite pure. Raies à 10, 5 et 3,34.
- FIG. 5. — RAMBERVILLER (Vosges). Muschelkalk moyen. N° 29. Illite avec flou central limité à 14 qu'on peut rapporter à l'hydrobiotite.
- FIG. 6. — DAMELEVIÈRES (M.-et-M.). Lettenkohle. N° 30. Illite probablement hydratée avec traces de kaolinite.
- FIG. 7. — DAMELEVIÈRES. Traité au chlorure de calcium et séché au benzène. Spectre de poudre. Aucune raie à 14 n'apparaît.
- FIG. 8. — BAINVILLE-AUX-MIROIRS (M.-et-M.). Keuper inférieur. N° 31. Mélange de montmorillonite et d'illite.
- FIG. 9. — DOMJULIEN rouge (Vosges). Keuper supérieur. N° 33. Illite: l'orientation imparfaite fait apparaître la raie à 4,48.



× 7.100

grandissement × 3

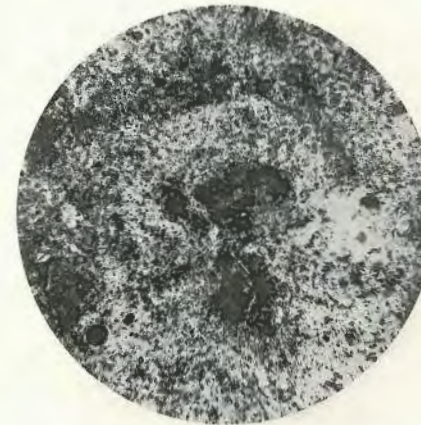


× 7.100

PLANCHE IV

ROCHES MARINES.

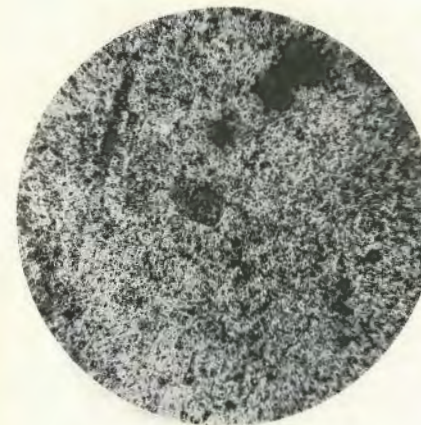
- FIG. 1. — JEANDELAINCOURT (M.-et-M.). Charmoutien. N° 8. Marne bleue. Exemple typique d'un mélange complexe: raies à 14, 12, 10 et 7 interprétées comme un mélange chlorite-hydrobiotite, illite et kaolinite. Raie à 4,7 de la chlorite bien visible.
- FIG. 2. — JEANDELAINCOURT. Traité au chlorure de calcium et séché au benzène. Spectre de poudre. La raie à 14 passe à 15 et s'intensifie.
- FIG. 3. — JEANDELAINCOURT. Chauffé à 200°. La raie à 10 s'intensifie et devient aussi intense que la raie à 7. De même les raies à 3,57 et 3,34.
- FIG. 4. — JEANDELAINCOURT. Chauffé à 500° (spectre de M. Mac Ewan). La raie à 14 subsiste. La présence de la chlorite est démontrée. La raie à 7 (001 de la kaolinite et peut-être 002 de la chlorite) a disparu.
- FIG. 5. — DARNIEULLES (Vosges). Muschelkalk. N° 1. Calcaire argileux. Minéraux micacés très dominants sur une faible proportion de kaolinite.
- FIG. 6. — HEMING (Moselle). Muschelkalk. N° 2. Calcaire argileux. Minéraux micacés à 14, 12, 10 très dominants sur une faible proportion de kaolinite.
- FIG. 7. — XEUILLEY marne (M.-et-M.). Sinémurien. N° 4. Marne bleue. Minéraux micacés légèrement dominants sur la kaolinite.
- FIG. 8. — XEUILLEY calcaire (M.-et-M.). Sinémurien. N° 5. Niveau plus calcaire du même gîte que l'échantillon précédent. La proportion de minéraux micacés augmente.
- FIG. 9. — CHAMPIGNEULLES (M.-et-M.). Toarcien. N° 12. Marne bleue. Minéraux micacés à peine dominants sur la kaolinite.



1



3



2



4

PLANCHE III

Photographie, obtenue au microscope électronique, des particules de Sépiolite extraite de la roche argileuse de SALINELLES (Gard).

Stampien. N° 43.

Par comparaison, la photographie de l'Attapulgite d'ATTAPULGUS (Georgie, U.S.A.).

Photographies de M^{me} MATHIEU-SICAUD. Laboratoire central des services chimiques de l'Etat.

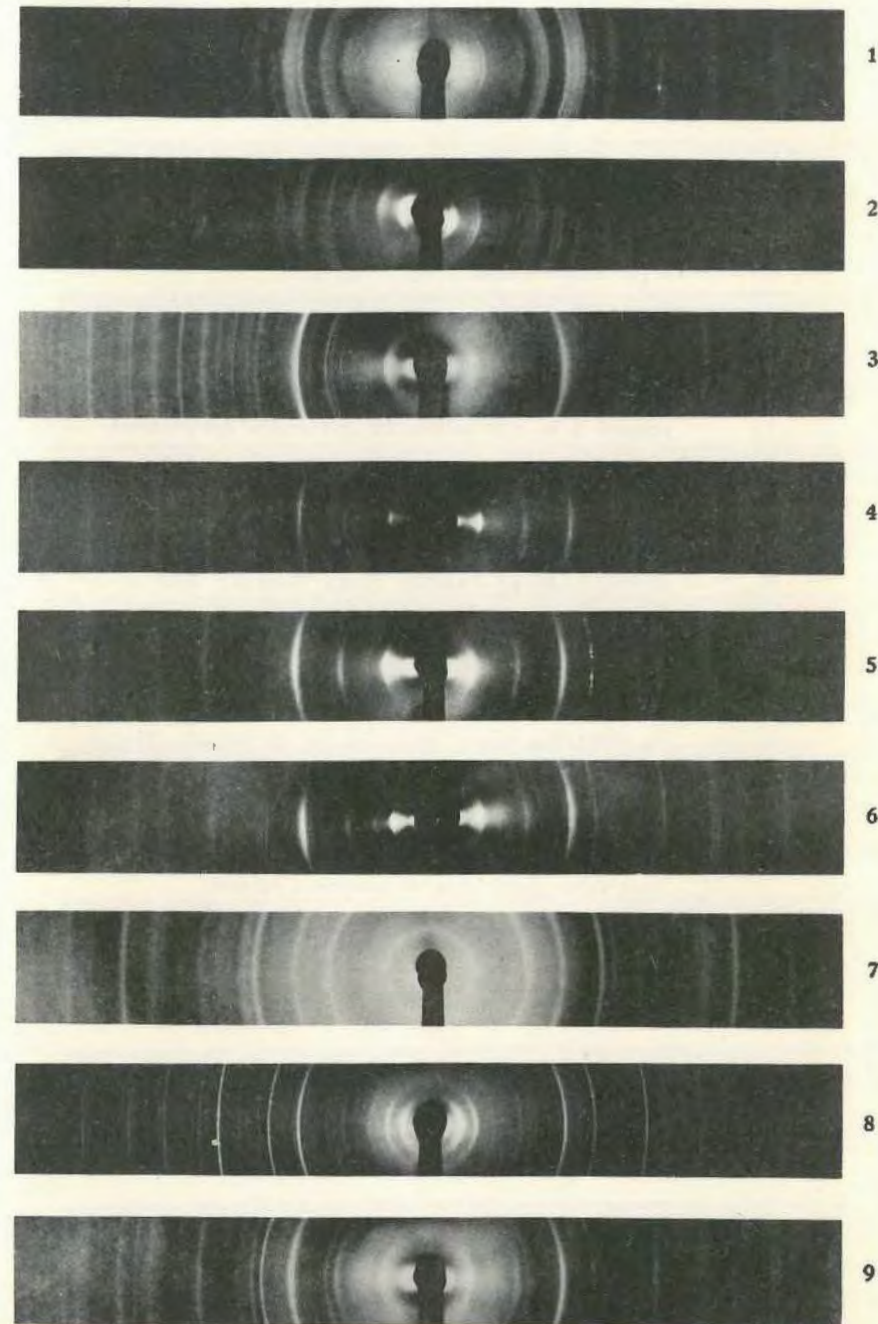


PLANCHE VI

ROCHES LAGUNAIRES (Suite).

FIG. 1. — DJEBEL GHASSOUL (Maroc). Jurassique. N° 35. Fortes accolades à 15 de la Montmorillonite. Nombreuses impuretés.

FIG. 2. — DJEBEL GHASSOUL. Phase argileuse mieux purifiée et traitée au glycérol. La raie à 15 passe à 17,5 et des harmoniques propres à la montmorillonite glycérolée apparaissent.

FIG. 3. — MORMOIRON (Vaucluse). Ludien. N° 36. Attapulgite type de Mormoiron. Quartz en impureté.

FIG. 4. — MORMOIRON vert (Vaucluse). Ludien. N° 36 bis. Montmorillonite. Quartz en impureté.

FIG. 5. — CORMEILLES-EN-PARISIS blanc (S.-et-O.). Ludien. N° 37. Attapulgite mêlée de minéraux micacés dont on voit les accolades à 5 et 3,34.

FIG. 6. — PÉCHELBRONN (Bas-Rhin). Sannoisien. N° 39. Mélange de minéraux micacés dominants sur la kaolinite. Convergence avec les vases marines.

FIG. 7. — SALINELLES (Gard). Stampien. N° 43. Sépiolite typique.

ROCHES FLUVIO-LACUSTRES ACIDES.

FIG. 8. — BAUDOUR (Hainaut, Belgique). Wealdien. N° 45. Kaolinite avec faible proportion de minéraux micacés.

FIG. 9. — SOMMANCOURT (Haute-Marne). Barrémien. N° 47. Kaolinite nettement dominante sur l'illite.

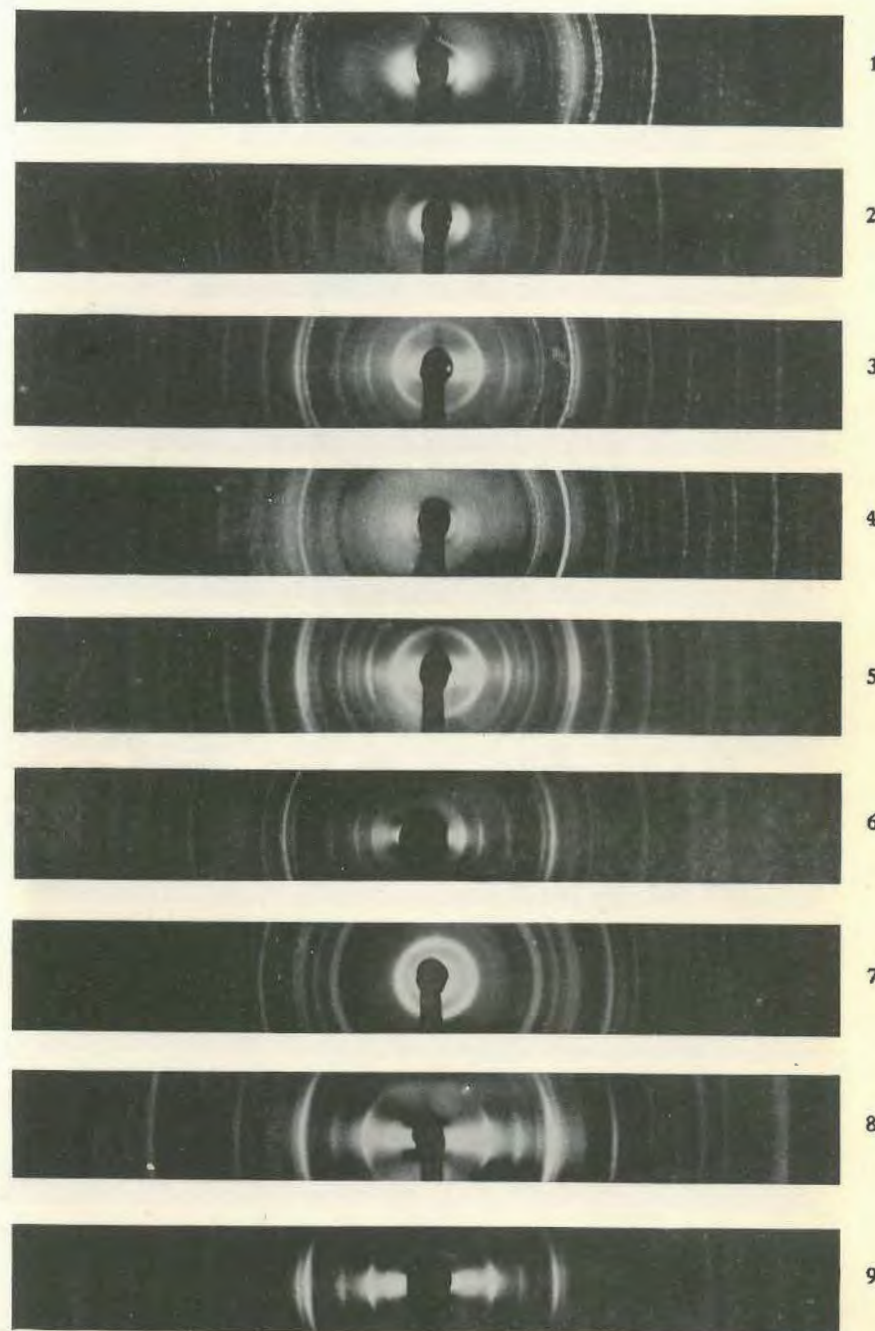


PLANCHE VII

ROCHES FLUVIO-LACUSTRES ACIDES.

- FIG. 1. — DOUZILLAC (Dordogne). Sidérolitique. N° 50. Kaolinite avec traces de minéraux micacés.
FIG. 2. — MONGUYON (Char.-Mar.). Sidérolitique. N° 51. Kaolinite avec traces de minéraux micacés.
FIG. 3. — LES COURTILS (Provins, S.-et-M.). Sparnacien. N° 53. Kaolinite largement dominante sur minéraux micacés.
FIG. 4. — WESTERWALD (Allemagne). Aquitanien. N° 54. Kaolinite dominante sur l'illite.

ROCHES DE LACS CALCAIRES.

- FIG. 5. — HERBÉVILLE (S.-et-O.). Lutétien. N° 56. Attapulgitte mêlée de traces de minéraux micacés dont on voit une accolade à 5.
FIG. 6. — CORMEILLES-EN-PARISIS (S.-et-O.). Sannoisien sup. N° 57. Marne bleue. Illite avec trace de kaolinite.
FIG. 7. — GERGOVIE vert (P.-de-D.). Stampien sup. N° 59. Illite presque pure.
FIG. 8. — DONNERY (Loiret). Aquitanien. N° 60. Mélange de montmorillonite et de kaolinite (Lac très pauvre en calcaire).
FIG. 9. — GERGOVIE (P.-de-D.). Burdigalien. N° 61. Illite pure.

