CONTRIBUTION A L'ETUDE MINÉRALOGIQUE DES CALCAIRES ARGILEUX DU MÉSOZOÏQUE

DES ENVIRONS DE GRENOBLE

("COUCHES A CIMENT" DU VALBONNAIS, GENEVRAY-DE-VIF, VOREPPE, GRENOBLE, SASSENAGE)

par Nicole PARJADIS DE LARIVIÈRE

INTRODUCTION

Situation des principaux gisements.

Les principaux gisements de « pierres à ciment » des environs de Grenoble (Fig. 1) se situent au Nord-Ouest et au Sud de cette ville, sur les flancs des deux grands massifs subalpins septentrionaux de la Chartreuse et du Vercors. D'autres gisements, de moindre importance, furent exploités sur la bordure occidentale du massif de Belledonne.

Les carrières de Sassenage, sur la rive gauche de l'Isère, celles de Comboire et de Seyssinet, sur la rive gauche du Drac, s'ouvrent au pied des falaises culminant au Moucherotte en Vercors. Celles de la Porte de France à Grenoble, des Combes et de Lachal, sur le versant occidental du Rachais-Jalla, et celles du Chevalon à Voreppe, entament, sur le côté droit de la cluse de l'Isère, l'extrémité sudouest du massif de la Chartreuse. Quant au gisement de la Pérèlle, il est exploité de part et d'autre de la vallée du Guiers-Mort, le long

¹ Diplôme d'Etudes Supérieures de Géologie, présenté devant la Faculté des Sciences de Grenoble, le 25 novembre 1958.

de la route conduisant de Saint-Laurent-du-Pont à Saint-Pierre-de-Chartreuse.

Au Sud de Grenoble, plusieurs carrières à ciel ouvert jalonnent la rive gauche de la basse vallée de la Gresse.

Plus à l'Est, sur le pourtour de Belledonne, on voit encore des traces d'exploitation à l'entrée Nord d'Uriage, ainsi que dans le Valbonnais, au Pont-du-Prêtre, sur la rive droite de la Bonne, affluent du Drac.

Les seuls gisements qui seront étudiés ici correspondent à des dépôts jurassiques et crétacés, situés plus spécialement dans le Lias inférieur (gisement du Pont-du-Prêtre, en Valbonnais), le Rauracien (gisement de Genevray-de-Vif, dans la vallée de la Gresse), le Berriasien (gisement des Combes, près de Grenoble) et le Sénonien (gisement de Sassenage). Cette restriction est nécessaire car les niveaux dits de « pierres à ciment » se retrouvent aussi dans d'autres étages, pour ne citer que les bancs marno-calcaires intercalés dans les marnes valanginiennes, qui furent exploités, il y a une centaine d'années, à Narbonne et à Noyarey, sur la rive droite de la cluse de l'Isère.

Historique de la fabrication des ciments et des exploitations cimentières de l'Isère ².

La fabrication des produits hydrauliques a beaucoup évolué depuis celle de la chaux grasse, employée déjà du temps des Romains, après extinction et mélange à des matières siliceuses ou argileuses cuites, telles que les roches de Pouzzoles (pouzzolanes) ou la brique pilée (« si testæ tusæ tertia pars additur melior materia erit » a écrit Pline l'Ancien), jusqu'à celle des ciments Portland artificiels modernes.

En dehors de ces chaux grasses, dites « chaux aériennes », on connaissait aussi les chaux hydrauliques faisant prise sous l'eau; dès 1756, John Smeaton signalait que les chaux hydrauliques se distinguent des chaux aériennes par une forte proportion d'argile.

A partir de 1812, un ingénieur des Ponts et Chaussées, Louis VICAT, commença des recherches sur les ciments en vue de la construction du pont de Souillac en Dordogne. En mélangeant du carbonate de chaux et de l'argile rouge, en les fondant, puis en les éteignant en pâte, il découvrit que cette dernière faisait prise sous l'eau, en quelques jours. Il appela ce premier liant : « chaux hydrau-

² On trouvera une bibliographie importante sur ce sujet dans l'ouvrage de P. Léon, La naissance de la grande industrie en Dauphiné, 1953.

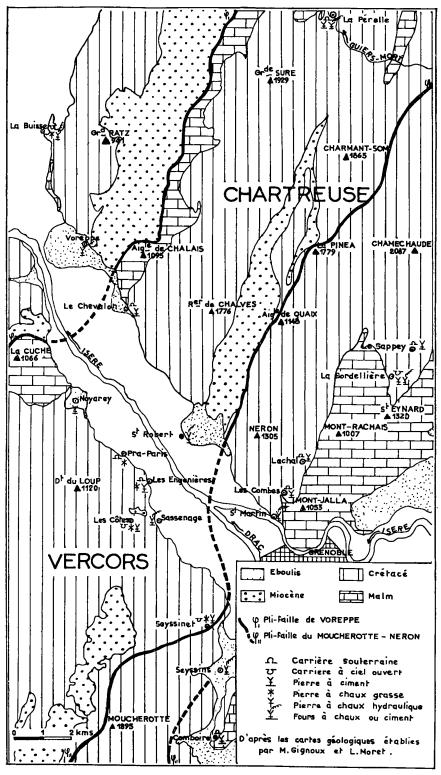


Fig. 1. — Carte topographique et structurale des environs immédiats de Grenoble, groupant les exploitations de carrières de pierre à ciment, à chaux grasse et chaux hydraulique.

lique », et par la suite, en modifiant les proportions d'argile incorporées au calcaire, fabriqua la chaux lourde et le ciment artificiel. En 1824, Louis Vicat prit un brevet pour la fabrication d'un véritable ciment Portland. C'est d'après les principes indiqués dans ce brevet que seront élaborés, plus tard et peu à peu, les divers ciments artificiels.

A partir de cette époque cependant, les recherches s'orientèrent vers des gisements de « pierres à ciment » répondant à la composition signalée par Louis Vicat (ciment naturel), car les mélanges destinés à la fabrication du ciment artificiel paraissaient alors trop difficiles à exécuter correctement. C'est ainsi que la première usine à ciment naturel en Amérique a été construite en 1818 à Fayette-ville (état de New-York), et la première usine à ciment artificiel, dans ce pays, n'a été construite qu'en 1873.

L'extinction des chaux hydrauliques, immédiatement après la cuisson, opération nécessaire pour empêcher l'expansion, produisait de la chaux proprement dite et des résidus granuleux, plus chargés en argile, appelés « grappiers », qu'on avait négligés, jusqu'au jour où l'on s'aperçut qu'en les broyant finement on obtenait un produit ayant une prise lente et des résistances appréciables. Ces grappiers broyés ont été vendus sous le nom de Portland naturel.

Actuellement, au lieu de séparer par blutage ces grappiers de la chaux hydraulique proprement dite, on renonce dans bien des cas à cette séparation, et le broyage de la chaux après extinction donne naissance, soit à des ciments naturels de résistance intermédiaire entre celles des chaux hydrauliques et celles des ciments artificiels, soit à des chaux éminemment hydrauliques.

Avant 1830, les carrières de la Porte de France, dans l'enceinte même de la ville de Grenoble, étaient exploitées à ciel ouvert; les couches inférieures, assez marneuses, étaient utilisées comme pierres à chaux hydrauliques, et les couches supérieures pour la chaux grasse, les moellons et la pierre de taille.

Mais la première tentative d'extraction et de transformation de pierre à ciment, aux environs de Grenoble, ne remonte qu'à 1835. C'est Voisin qui l'entreprit dans les marno-calcaires du Valanginien, à Narbonne, au-dessous du Néron.

Peu après, un colonel du Génie, Félix Breton, découvrit le banc de pierres à ciment de la « Porte de France ». D'après la tradition orale, dans l'usine à chaux grasse qu'exploitait alors Joseph Carrière à la Porte de France, on triait avec soin certains morceaux de pierre qui, à la cuisson, devenaient brun rouge, mais ne fusaient pas à l'extinction, donnant ainsi des grains durs, colorés, parfois volumineux, dans la pâte de chaux grasse éteinte. Un petit stock de ces produits triés fut un jour employé à faire un macadam devant les bureaux; écrasé à la dame, il fit prise. Ce fait attira l'attention du colonel Breton: il fit des essais de broyage et de gâchage et découvrit le ciment prompt.

La finesse du grain du banc de pierres à ciment dit de « la Porte de France » et l'homogénéité de sa constitution en font un calcaire de premier ordre pour fabriquer du ciment naturel (« ciment » et non pas « chaux », car il n'a pas besoin d'extinction). Celui-ci est à prise prompte s'il est cuit modérément, à prise demi-lente s'il est cuit à plus haute température.

En 1842 commença l'exploitation de ce banc par Joseph Carrière. La régularité de composition, reconnue très vite, fut à la base de l'industrie cimentière qui en est née. Des analyses furent faites pour la vérifier avec soin. Notons, à titre historique, celles d'Emile Gueymard (Rapport inédit, 1845), ingénieur des Mines et premier professeur de Géologie à l'Université de Grenoble. A la fin du xix siècle, il y avait 120 km de galeries sous le Mont-Jalla et partout on trouvait de 23,8 à 24 % d'argile.

Dès 1850, plusieurs entreprises importantes existaient dans la région grenobloise, mais ce n'est qu'en 1857 que les usines Vicat s'installèrent au Genevrey-de-Vif; et, en 1868, les usines Pelloux, au Pont-du-Prêtre en Valbonnais. Les autres maisons exploitaient le gisement de la « Porte de France » : Arnaud et Carrière aux Combes, Dumolard et Viallet dans le Mont-Jalla; Dupuy de Bordes et Cie à Seyssins (Comboire). En 1878, ces trois maisons fusionnèrent sous la raison sociale « Société générale et unique des Ciments de la Porte de France ». En 1920, fonctionnait sur des bases déjà modernes, une usine à ciment artificiel à Sassenage, qui sera remplacée plus tard par l'usine très moderne de Saint-Robert, en constante évolution technique depuis lors. Les autres petites exploitations qui s'étaient ouvertes dans la vallée de l'Isère, à la fin du siècle dernier, n'eurent qu'une existence éphémère.

La production annuelle de l'industrie grenobloise de ciments, qui était, en 1869, de 40 000 tonnes, est à l'heure actuelle de plus d'un million de tonnes annuellement.

I. GISEMENTS LIASIQUES DE PONT-DU-PRETRE ET D'URIAGE

1. Géologie des gisements.

A la base du Lias, les alternances de bancs plus calcaires ou plus marneux du « Lias calcaire » (Rhétien-Domérien) furent à l'origine de nombreuses exploitations ou tentatives d'exploitation. Les carrières de Saint-Laurent-en-Beaumont, au Sud-Est de La Mure, celles de La Motte-Saint-Martin, dans les gorges du Drac, de Villar-Saint-Christophe, sur le plateau mateysain, et de Saint-Georges-de-Commiers, au pied du Connexe, sont depuis longtemps abandonnées.

Le gisement le plus intéressant est situé sur le bord de la route départementale de Valbonnais, au Pont-du-Prêtre, sur les rives de la Bonne.

Il s'agit de calcaires argileux noirs, très compacts, feuilletés en grand, de pendage général 60° Ouest, avec de légères ondulations et localement des renversements de couches. Ils forment la montagne de la Croix du Roussillon, dans laquelle furent ouvertes neuf galeries superposées, dont la première au niveau du pont.

Deux couches à ciment, l'une de 4 mètres, l'autre de 3, à peu près verticales, ont 1 km de hauteur et 6 à 7 km de longueur. La couche de 4 mètres d'épaisseur, découverte sur toute sa surface, forme une muraille à pic de 1 km de hauteur sur quelques kilomètres de longueur; c'est au bas de cette muraille, côtoyée par la route, que coule la Bonne. L'homogénéité des couches et la constance de leur composition chimique (21 à 25 % d'argile) permetaient aux usines Pelloux d'obtenir naturellement un excellent ciment Portland. L'exploitation a cessé en 1940.

En amont de Pont-du-Prêtre, la 1^{re} galerie s'ouvrant sur la rive droite de la Bonne permet d'échantillonner les bancs de calcaires argileux exploités.

Ceux-ci, en lames minces (lames 1711-1712), ont un aspect général homogène. La pâte argilo-calcaire foncée, cryptocristalline, est constellée de petites sphères de marcassite, minéral accessoire principal, souvent groupées en amas volumineux bordés de limonite. Les grains de quartz sont peu abondants, tandis que les cristaux engrenés de calcite forment, par endroits, des noyaux bien individualisés. La microfaune n'est ni spécifique, ni abondante : ce sont quelques foraminifères et des spicules de spongiaires.

Un autre gisement intéressant dans le Lias inférieur est la carrière d'Uriage, abandonnée depuis 1926. En aval de l'établissement thermal d'Uriage, on remarque à 200 m de la route, sur la rive droite du ruisseau le Sonnant, une carrière à ciel ouvert où les bancs autrefois exploités sont dirigés sensiblement du Nord-Est au Sud-Ouest, avec un pendage d'environ 60° Sud. L'exploitation sc faisait par gradins droits, sur une hauteur de 25 m environ. De même qu'en Valbonnais, ces calcaires étaient utilisés pour la fabrication d'un ciment naturel à prise lente.

Cependant, ces couches ne ressemblent pas tout à fait à celles du Valbonnais; elles sont formées de calcaires argileux d'une teinte très foncée, bleu noir, où l'on remarque des filonnets de calcite et de quartz quelquefois assez volumineux, et pouvant même former des noyaux irréguliers. Le délit de ces calcaires donne des surfaces unies, représentant des plans de glissements, avec de touts petits feuillets d'argile intercalés. La pâte, au microscope, est moins fine : la calcite masquant en grande partie l'argile, qui n'apparaît qu'en traînées floconneuses. Les cristaux de calcite sont petits, sans forme cristalline. On ne voit pas trace d'organismes; la roche contient, par contre, de très nombreuses sphères de marcassite, très disséminées.

2. Etude minéralogique et chimique d'un calcaire argileux de Pontdu-Prêtre.

Cet échantillon (lame 1712) a été recueilli dans la plus basse galerie du Pont-du-Prêtre, au mur de la couche exploitée. C'est une roche massive, lourde, très dure, d'une teinte générale bleu noir et à cassure conchoïdale.

a) Examen microscopique.

L'importance de la phase argileuse voile en grande partie la calcite : celle-ci apparaît en cristaux informes, de quelques μ ; parfois en agrégats de 20 à 50 μ . Disséminés à travers la roche, on remarque quelques grains de quartz, dont les plus gros atteignent 45 μ . La marcassite, invisible à l'œil nu, imprègne toute la roche; ce sont des granules très petits, le plus souvent isolés, mais parfois aussi alignés ou amalgamés; leur altération a laissé, par place, des traînées d'oxyde de fer, dont la teinte rouille tranche nettement sur le fond. Les organismes, très rares, sont des restes de spicules d'éponges et de foraminifères.

b) Etude aux rayons-X de la phase argileuse et détermination des minéraux argileux.

La séparation de la phase argileuse du calcaire étudié a été faite suivant la technique décrite par G. MILLOT (1949, p. 79).

Sur l'argile obtenue, un radiogramme de Debye-Scherrer (planche I, fig. 1) donne les raies suivantes :

10,71 m; 7,1 f; 4,48 m; 4,27 m; 3,35 TF; 2,57 AF; 2,19 m; 1,82 F; doublet à 1,55 et 1,51 m, etc...

L'illite domine dans ce mélange, où la proportion de kaolinite peut s'évaluer à 20 % et la fraction non éliminée de quartz à 17 %.

c) Analyse chimique de la phase argileuse et calcul de la formule des minéraux argileux.

L'analyse chimique de l'argile (Analyste : N. PARJADIS DE LARI-VIÈRE, Grenoble, 1958) est indiquée dans le tableau ci-dessous (A). le pH de la suspension à 2 % est basique : 9.

	A	В
SiO ₂ Al ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃ FeO MgO CaO Na ₂ O K ₂ O TiO P ₂ O ₅ MnO	52,30 16,94 3,56 0,18 0,79 3,50 0,85 2,95 0,80 traces 0,12	47,60 20,00 5,50 0,28 1,23 5,45 1,32 4,00
$H_2O + \dots H_2O - \dots$	6,80 11,02	5,30 8,50
Total	99,81	99,78

En formant, au moyen des proportions moléculaires, l'illite d'une part, et la kaolinite d'autre part, on voit que la silice restante, non combinée en silicate, correspond à 17 % de l'ensemble. En soustrayant cette valeur, ainsi que celles de silice, d'alumine et d'eau nécessaires pour former la kaolinite, des chiffres fournis par l'analyse réelle A, on peut considérer les pourcentages d'oxydes res-

tants, ramenés à 100 g de silicate comme appartenant uniquement à un minéral argileux silicaté (illite) dont l'analyse, recalculée, est indiquée ci-dessus (B).

Cette illite a pour formule structurale:

$$(OH)_2$$
 Al_2 $(Si_{4-x}$ Al_x $O_{10})$ K_x

où Al_2 peut être remplacé par $Fe^{\prime\prime\prime 2}$, $Fe^{\prime\prime 3}$ ou $Mg^{\prime\prime 3}$, K par Ca, Na ou Mg (x plus petit que 1). Il y a 10 oxygènes et 2 oxhydriles, donc 22 valences négatives qu'il faut saturer.

D'après la méthode de C. O. HARVEY, utilisée par G. MILLOT (1949, p. 116), on peut calculer la formule de ce minéral argileux.

Ce calcul (Tableau I, n° 1) donne, pour la formule de l'illite extraite du calcaire argileux du Lias de Pont-du-Prêtre, le résultat suivant :

$$(OH)_2$$
 $(Al_{1,25}$ Fe''_{0,3} Fe''_{0,01} Mg_{0,13}) $(Si_{3,49}$ Al_{0,51}) O₁₀ $(Ca-Na-K)_{0,98}$

Il y a seulement 1,69 ion en position octaédrique et, par ailleurs, 0,98 ion en position intermédiaire.

L'analyse chimique de la phase argileuse permet, d'autre part, de connaître les teneurs en potasse et en magnésie, ainsi que la valeur du rapport $\mathrm{SiO_2/Al_2O_3}$, pour 100 g de silicate déshydraté : données intéressantes, car la composition chimique de la phase argileuse varie en fonction du milieu de genèse. Les valeurs de $\mathrm{K_2O}$ et MgO sont respectivement 3,54 et 0,94; quant au rapport $\mathrm{SiO_2/Al_2O_3}$ pour 100 g de silicate déshydraté, il est égal à 3,07.

d) Formule représentative.

Le calcaire argileux de Pont-du-Prêtre contient 71,5 % de carbonate de chaux, et 2 % de magnésie. Il faut ajouter 1,8 % d'insolubles et 2,20 % de fer calculé en sesquioxyde.

Si on appelle C: la phase carbonatée (calcite ou dolomite), I: les insolubles (principalement le quartz), Fe: les sels de fer (marcassite, hydroxyde ou magnétite), A: la phase argileuse (en donnant entre parenthèses l'initiale des minéraux argileux, jointe au signe marquant leurs proportions), le gypse étant désigné par son nom, on peut écrire que les composants cardinaux du gisement liasique de « pierres à ciment » de Pont-du-Prêtre, en Valbonnais, ont pour valeur respective:

C, 71,5 (calc.); I, 1,8; Fe 2,20 (marcas. et hydrox.); gypse, 0,64; A 23,86 (I >>> K).

3. Conclusion.

On sait qu'une mer relativement profonde s'étendait au Lias, dans la région de Grenoble; ses dépôts sont actuellement représentés, au sommet, par des schistes calcaro-argileux, à la base par des calcaires argileux. Notre étude permet de préciser les conditions de sédimentation de ces derniers : les calcaires argileux de Pont-du-Prêtre se sont déposés sous forme d'une vase argilo-calcaire foncée, en milieu réducteur suffisamment potassique pour permettre une néoformation de minéraux micacés dominante sur celle de la Kaolinite.

II. GISEMENT RAURACIEN DE GENEVRAY-DE-VIF

1. Géologie du gisement.

Au Nord de Grenoble, les calcaires marneux noirs du Rauracien forment la base du Saint-Eynard et descendent, avec une inclinaison croissante, par la côte de Chantemerle, jusqu'à la porte Saint-Laurent à Grenoble, où ils sont à peu près verticaux. Les exploitations de pierres à ciment de Crolles, Bernin, Saint-Ismier et de la Porte Saint-Laurent sont aujourd'hui abandonnées: la plus importante carrière était située sur la rive droite de l'entonnoir du torrent du Manival (creusé entre le Saint-Eynard et la corniche des Petites Roches), au pied des escarpements qui bordent le versant droit de la vallée de l'Isère; là, deux couches, contenant de 22 à 28 % d'argile, de 3 m de puissance, dirigées N 43° E, et inclinées de 30° environ vers l'Ouest, étaient exploitées (jusqu'en 1898) pour la fabrication d'un ciment à prise lente.

Ces mêmes bancs apparaissent au Sud de Grenoble, dans le bassin de la Gresse, où ils sont exploités au Genevray-de-Vif et jusqu'à Saint-Guillaume par les usines des Saillants (Société des ciments Vicat) qui en tirent un ciment Portland artificiel. L'exploitation se fait uniquement à ciel ouvert. Elle est la seule à subsister dans cet étage aux environs de Grenoble.

Dans la carrière de Champ-Rond, la plus importante, ces calcaires marneux, de pendage Nord-Ouest 45°, sont en général d'une composition assez homogène dans l'épaisseur de chaque banc, mais souvent très variable d'un banc à un autre. Les bancs exploitables, bien lités, sont séparés les uns des autres par de minces feuillets très argileux. Cette argile, ordinairement fine, est toujours saupoudrée par du sulfure de fer très divisé.

Les lames minces taillées dans les assises supérieures de la carrière montrent une pâte homogène, argilo-calcaire, cryptocristalline, pigmentée en ocre et brun par les oxydes de fer et la marcassite. Par endroits, font saillie de petits cristaux de calcite, tantôt isolés, tantôt groupés en veinules, quadrillant le fond argileux. Le quartz détritique est assez abondant (surtout dans la lame 1721); ce sont des grains petits et arrondis, des éclats, et parfois des plages corrodées et souillées d'impuretés ferrugineuses. Il n'y a pas trace d'organismes.

Cette description des bancs supérieurs exploités reste valable pour les assises sous-jacentes; cependant, dans un échantillon (lame 1722) pris au bas de la carrière, si la texture de la roche reste toujours homogène, la finesse de la pâte s'est accrue en sens inverse de sa pigmentation: la marcassite globuleuse n'est plus dispersée mais réunie en amas; les gros cristaux de calcite se détachent, nombreux, à côté des grains de quartz détritique. De plus, on remarque des restes d'organismes brisés, indéterminables.

2. Etude minéralogique et chimique d'un calcaire argileux.

C'est immédiatement en dessous de la découverte, dans la carrière de Genevray-de-Vif, qu'a été pris l'échantillon (lame 1720) destiné à cette étude. Roche foncée, relativement tendre, présentant un fin litage et se délitant dans l'eau au bout de quelques jours.

a) Examen microscopique.

L'aspect général est celui d'un calcaire argileux (Planche II, fig. 1). L'ensemble est homogène. Les grains de calcite de la pâte sont petits et possèdent rarement leur forme rhomboédrique; ils n'apparaissent qu'en bordure de la préparation, car ils sont en général masqués par la phase argileuse amorphe et floconneuse. Parfois, de petits îlots calcaires de 32 à 50 μ s'individualisent au sein de la pâte, mais ils sont rares. La phase détritique, importante, est constituée uniquement par le quartz, en grains dispersés, aux formes les plus diverses, et dont la taille oscille autour de 30 μ . Les minéraux accessoires sont les suivants : très nombreuses sphères concrétionnées de marcassite, imprégnation générale ocre de sesquioxyde de fer et quelques cristaux de magnétite.

b) Etude aux rayons-X de la phase argileuse et détermination des minéraux argileux.

En employant le même procédé d'extraction signalé plus haut, il a été possible d'isoler la phase argileuse du calcaire rauracien et d'obtenir, par la méthode des poudres de Debye-Scherrer (Planche I, fig. 2) un diagramme sur lequel les écarts réticulaires mesurés sont les suivants:

10,71 f et floue; 7,1 tf; 4,48 F; 4,27 F; 3,36 tf; 3,32 TF; 2,57 AF; doublet à 2,27 et 2,23 m; 1,82 F; 1,37 F, etc...

En dehors des lignes correspondant à une fraction fine de quartz (15 %), la faiblesse de la raie de base de la Kaolinite, dans ce spectre, laisse supposer que ce minéral n'entre pas pour une part plus grande que 4 à 5 % dans ce mélange, formé en grande partie d'illite.

c) Analyse chimique de la phase argileuse et calcul de la formule des minéraux argileux.

Les résultats obtenus par l'analyse chimique de cette argile sont indiqués dans le tableau ci-dessous, en A (Analyste: N. Parjadis de Larivière, Grenoble, 1958). Le pH de la suspension à 2 % est pratiquement neutre: 6,8.

A	В
56,62 20.06	50,40 21,40
3,87	5,50 0,40
2,08 3,60	3,00 5,15
0,43 2,32	0,60 3,30
1,00 traces	_
0,87	1,00
	9,30
	56,62 20,06 3,87 0,29 2,08 3,60 0,43 2,32 1,00 traces 0,10

En éliminant de l'analyse globale A, les pourcentages d'oxydes nécessaires pour former l'illite et la kaolinite, on obtient le pourcentage de silice libre. En reprenant les calculs, on obtient, pour la composition de l'illite, les résultats indiqués ci-dessus (B).

Cette illite a pour formule (calcul, tableau I, n° 2):

$$(OH)_2$$
 $(Al_{1,23} Fe''_{0,28} Fe''_{0,02} Mg_{0,31})$ $(Si_{3,49} Al_{0,51}) O_{10} (Ca-Na K)_{0,76}$

La somme des ions en position octaédrique est de 1,84, valeur un peu faible pour un minéral de la série heptaphyllite, mais qui s'explique par la difficulté d'élimination du quartz, comme impureté. D'autre part, un silicium sur huit est remplacé en position tétraédique par l'aluminium, et la couche intermédiaire possède 0.76 ion.

Pour 100 g de silicate déshydraté, le rapport SiO₂/Al₂O₃ est égal à 2,82; et les proportions de potasse et magnésie sèches sont 2,56 et 2,31.

d) Formule représentative.

L'échantillon de calcaire argileux étudié contient environ 56 % de carbonate de chaux, 1,89 % de magnésie et 10,20 % d'insolubles. Le fer, exprimé en sesquioxyde, équivaut à 3,32 %. Il y a en outre des traces de sulfates (0,54 de SO³—).

La formule représentant ce calcaire (en reprenant les indices désignés p. 169) est la suivante :

C, 56 (calc.); I, 10,20; Fe, 3,32 (marcas. et magn.); gypse, 0,54; A, 29,94 (I >>>> K).

3. Conclusion.

Les calcaires argileux rauraciens correspondent donc à la consolidation de vases pélagiques, dans une mer probablement littorale et tranquille; il est possible de préciser, grâce à l'étude de leur phase argileuse, que les conditions de sédimentation, dans ce milieu marin pratiquement neutre, furent celles d'une boue calcaire où ne se produisaient pour ainsi dire pas de phénomènes réducteurs capables de provoquer la genèse des sulfures et celle de la kaolinite.

III. GISEMENTS BERRIASIENS DES ENVIRONS DE GRENOBLE

1. Géologie des gisements des Combes, de Comboire et du Chevalon.

Entre les marnes valanginiennes ou « marnes de Narbonne » et les calcaires durs du Tithonique, les bancs du Berriasien, au niveau de la cluse de l'Isère, constituent une assise d'une centaine de mètres environ. Ils sont tous formés par des marno-calcaires bleus typiques, à grain fin. Dans l'un d'eux, aux Combes, nous avons trouvé un bel exemplaire de *Pygope diphyoides*. Des plissements locaux fournissent très souvent de petites quantités de pétrole, d'ozocérite (Hatchettite) et même de gaz combustible, ce qui laisserait supposer que ce Berriasien est une roche-mère de pétrole.

A leur base, les calcaires argileux du Berriasien sont exploités pour ciment prompt par la Société des Ciments de la Porte de France, sur le flanc Ouest du Rachais, depuis l'Isère jusqu'à Clémencière, et le long du Drac, depuis Comboire jusqu'à Seyssins. La Société des Ciments de Voreppe et Bouvesse exploite ces mêmes bancs au Chevalon de Voreppe. En continuant vers le Nord, on retrouve cette même assise géologique sur la route de Saint-Laurent-du-Pont à la Grande Chartreuse, au lieu-dit « La Pérèlle », où les bancs de direction N 50° E et à pendage 45-50° SE sont exploités par la Société des Ciments Vicat de la Grande Chartreuse. Ces bancs se prolongent, en outre, tout le long de la Chartreuse ³, et jusque dans les Bauges ⁴.

A Comboire, où les assises ont un pendage Ouest de 30°, des failles découpent le gisement comme un damier, où certaines cases seraient plus hautes que les autres. Une faille très importante, à peu près N-S, longe, sur le flanc opposé au Drac, tout le rocher de Comboire. Aux Combes, où le pendage est W 60°, deux failles à

³ A la Bordellière, au pied des escarpements du Saint-Eynard, le banc de la « Porte de France », ayant 5 mètres de puissance, de direction NNE-SSW avec une inclinaison de 26° vers WNW, était exploité avant 1870. Tandis qu'au Sappey, à l'Ouest de la route de Grenoble à la Grande Chartreuse, plusieurs bancs, dont celui de la « Porte de France », sensiblement parallèles, orientés Nord-Sud et d'un pendage d'environ 70° Est, étaient encore exploités en 1940. Ce dernier champ d'exploitation fut abandonné, car il était limité au Sud par les propriétés de la Société des Ciments de la Porte de France et, au Nord, interrompu par une faille de direction SE-NW à rejet de 50 m vers l'Est.

⁴ Les exploitations de la Dent du Chat (Savoie), dans la Chaîne de l'Epine, entre le lac du Bourget et le Rhône, sont actuellement abandonnées.

pendage Nord-Ouest de 10 à 20° ont provoqué le glissement de deux tronçons de la montagne du Rachais, déplacés en se chevauchant vers le NW par rapport à leur base restée en place, et une autre faille NNW - SSE avec un pendage presque vertical, un effondrement d'une centaine de mètres aux environs de Clémencière. Les autres failles rencontrées par cette exploitation sont disposées en touches de piano, avec des rejets allant de quelques centimètres à vingt mètres maximum. L'une d'elles, cependant, en direction de Quaix, a un rejet de 100 mètres.

L'épaisseur des bancs de marno-calcaires est très régulière et s'est trouvée vérifiée à maintes reprises, aussi bien dans les vieux travaux de la Porte de France que dans ceux des Combes, de Lachal ou de Comboire. Leur succession s'est toujours montrée identique; ils ont des teneurs variables en carbonate de chaux, mais les mêmes teneurs se retrouvent toujours aux mêmes niveaux par rapport au calcaire tithonique sous-jacent.

En partant du Tithonique, on rencontre:

- 1) Sur 1,20 m d'épaisseur, des bancs à 78 % de carbonate de chaux : « chaux du mur » 5;
- 2) Une intercalation de 1 mètre de pierres à 71 % : « banc n° 3 »;
- 3) Un banc de 1,60 m de pierres à 76 % : « mur du petit banc »;
- 4) Un banc de 1,40 m de pierres à 70 % : « petit banc n° 2 »;
- 5) Un banc de 2,60 m de pierres à 76 % : « cariotte »;
- 6) Un banc de 3 m à 3,50 m d'épaisseur de pierres à 70 % de carbonate de chaux : « gros banc n° 1 »;
- 7) Au-dessus de ce gros banc, un banc de 1,20 m d'épaisseur, le seul de son espèce, n'a pas une composition absolument régulière sur toute l'étendue du gisement, c'est pourquoi son exploitation est réputée dangereuse : « banc noir »;
- 8) Après ce banc et sur 35 m d'épaisseur, s'étagent des bancs dont la teneur en carbonate de chaux s'échelonne de 80 à 90 %:
 « bancs de pierres dures »;
- 9) Puis, pendant une quinzaine de mètres, on trouve des bancs alternés à 68 % et 69 % (l'un d'eux, de 5,50 m d'épaisseur, est appelé « banc de pierres tendres »). Ces bancs ne sont que partiellement exploités, nous verrons plus loin pourquoi;
- 10) Après une nouvelle série de bancs durs, on trouve :
- 11) A 98 m du toit du Tithonique, qui forme le mur de l'ensemble, les premiers bancs de marnes dont la teneur en carbonate de chaux ne dépasse pas 60 % : « bancs de pierres argileuses ».

⁵ Ce nom et ceux qui suivent sont donnés par les exploitants.

La teneur moyenne du gisement des Combes, où cette succession type de bancs a été relevée, est aux environs de 70 % de carbonate de chaux. Il en est de même à Comboire. Dans les deux gisements, c'est la pierre du gros banc de 3 m et celle du petit banc de 1,50 m, situé sous les 2,60 m de cariotte, qui fournissent le ciment prompt dont les qualités exceptionnelles sont bien connues 6.

Par comparaison, une coupe du grand travers-bancs, étage 275, de l'exploitation des Ciments de Voreppe et Bouvesse au Chevalon, indique que la succession de ces bancs, d'ailleurs à pendage inverse des précédents (Sud-Ouest 50°), n'est pas la même qu'aux Combes et à Comboire. Ce gisement se caractérise en effet par une alternance très régulière entre les bancs de calcaires argileux bleuâtres, tous exploités, et les bancs calcaires inexploitables.

2. Etude micrographique de quelques échantillons des Combes et du Chevalon.

Une première série d'échantillons a été prise aux Combes, dans le travers-banc de Lachal, et se rapporte aux différents bancs de calcaires argileux exploités.

Après refroidissement, les «grumes» formées à la cuisson sont simplement moulues et livrées au commerce, après repos dans des silos. L'adjonction d'eau ou de plâtre n'est pas nécessaire pour éviter l'expansion; en esset, s'il restait un excès de chaux non saturée, elle gonslerait en s'éteignant après la prise du ciment, mais ici ce n'est pas le cas : la pierre du gros banc et celle du petit banc étant si exactement dosées par la nature, leurs silico-aluminates saturent totalement la chaux.

Toutes les pierres, autres que celles de ces deux bancs particuliers, et qui sont parfois extraites pour des nécessités d'exploitation, étaient autrefois rejetées à l'extérieur et formaient les énormes haldes que l'on voit encore au-dessous des Combes ou à la Porte de France. A l'heure actuelle, ces pierres inutilisables pour le ciment prompt, sont transportées à l'usine de ciment artificiel, où elles servent de correction à la pierre provenant des bancs de Sénonien des carrières de Sassenage. Mais leur tonnage étant insuffisant, de nouvelles exploitations ont été aménagées dans les bancs du toit plus marneux, fournissant, grâce à leur régularité très grande, et à leur grain très fin, des appoints de pierres de mélange ou de correction très intéressants.

⁶ Pour obtenir un produit parfait, il faut que la pierre utilisée soit pure de tout mélange; elle est exploitée en souterrains et les travaux d'exploitations sont limités aux deux bancs ci-dessus. La pierre est ensuite cuite dans des fours droits, où elle est répartie en lits successifs séparés par des lits de charbon; comme le tirage se fait à la base du four, la cuisson est ainsi continue. Au cours de cette opération, la pierre est d'abord décarbonatée, c'est-à-dire que tout le carbonate de chaux passe à l'état de chaux, avec dégagement de gaz carbonique. Ceci se produit dans la partie supérieure du four; lorsque la charge descend et atteint les zones où la température est plus élevée : 1 200 à 1 300°, les éléments de l'argile : silice, alumine et fer, réagissent sur la chaux vive formée pour donner des produits chimiques nouveaux : silico-aluminates mono, bi ou tricalciques. Ce sont ces derniers produits qui sont hydrauliques et qui, ultérieurement, en présence de l'eau, réagiront pour amener la prise et le durcissement.

L'examen microscopique, dans leur ensemble, des premiers bancs de Berriasien appelés: cariotte, gros banc n° 3 et banc noir (lames 1093 - 1094 - 1095), montre des roches pratiquement dépourvues de minéraux détritiques: sont visibles, cependant, de très petits grains de quartz et quelques mouchetures de glauconie. On peut noter la présence constante, en assez grosse quantité, de marcassite, en amas de structure granulaire ou microglobuleuse.

La microfaune apparaît caractérisée par l'importance des Ciliés par rapport aux espèces de petits foraminifères rares et indéterminables et aux restes de Crustacés Ostracodes. Les Calpionelles, essentiellement Calpionella alpina et Calpionella elliptica, sont attribuées au Crétacé, car elles voisinent avec de rares Tintin-nopsella carpathica (Planche II, fig. 2 et 3).

Quant à la pâte, elle est argilo-calcaire foncée, assez fine ou diffuse à débris d'origine parfois organique; elle est uniforme dans toutes les coupes et indique des roches franchement pélagiques.

Une coupe faite dans un calcaire tithonique (lame 1092) immédiatement sous-jacent aux marno-calcaires berriasiens, révèle, dans une pâte fine, cryptocristalline, un véritable pullulement de Calpionella alpina et de Calpionella elliptica, associées à de rares Radiolaires; une ou deux formes semblent proches de Tintinnopsella carpathica et peut-être de Stenosemellopsis hispanica.

On pensait autrefois que l'association Radiolaires-Calpionelles était une indication intéressante pour caractériser le Tithonique, mais il semble maintenant que ce critère ne soit pas suffisant, car si l'on observe l'association entre elles des Tintinnides, on s'apercoit que certaines formes, telles que Calpionella alpina et Calpionella elliptica sont tithoniques et berriasiennes, et que d'autres comme Stenosemellopsis hispanica et Tintinnopsella carpathica ne débutent qu'avec le Crétacé et se prolongent ensuite dans le Valanginien et l'Hauterivien: la limite micropaléontologique ne correspondrait peut-être pas avec la limite lithologique classique, basée sur la différence de faciès existant entre les calcaires très compacts tithoniques et les calcaires marneux plus ou moins friables berriasiens.

Les coupes suivantes, faites dans les bancs de « pierres dures, pierres tendres et pierres argileuses » (lames 1167-1168-1171) sont, par contre, franchement berriasiennes.

Les éléments détritiques, tels que le quartz ou la glauconie, les minéraux lourds tels que la marcassite, granulaire ou allongée, laissent assez de place à une pâte diffuse plus ou moins argileuse. La faune est caractérisée par des Radiolaires, des sections transversales surtout de spicules de Spongiaires, des Textularidés à test

arénacé. Les Calpionelles y sont moins nombreuses que précédemment, mais avec une plus grande variété de formes nettement crétacées, telles que *Tintinnopsella carpathica*, *Stenosemellopsis hispanica*, *Calpionellites darderi*. Une forme voisine de *Favelloïdes*, trouvée dans la plaque mince faite dans le banc de « pierres argileuses », indiquerait même que l'on est déjà dans le Berriasien moyen.

L'étude microscopique d'une autre série d'échantillons provenant des bancs calcaires du Berriasien du Chevalon, sur la rive droite de l'Isère, au Nord-Ouest de l'arête de la Grande Sure, n'apporte rien de nouveau à l'étude précédente, faite sur le gisement des Combes, si ce n'est la confirmation que les assises correspondant au Berriasien inférieur ont certainement, au moins, 80 mètres d'épaisseur.

Les lames faites dans les calcaires marneux gris des galeries n° 4 et 5, perpendiculaires au grand travers-bancs du Chevalon (lames 1518-1519), montrent une pâte homogène argileuse à faune pélagique abondante : Calpionella alpina, Calpionella elliptica, Stenosemellopsis hispanica et Calpionellites sp.; Ostracodes et fragments de loges de Foraminifères devenus, de ce fait, indéterminables, se mêlent aux spicules de Spongiaires et aux débris monocristallins de calcite. Il n'y a pas ou peu de quartz détritique, aucune trace de glauconie, mais une pigmentation assez nette de marcassite. Ces roches sont donc en tous points semblables aux calcaires pélagiques à foraminifères, étudiés plus haut. La faune ciliée appartient uniquement au Berriasien inférieur.

3. Etude minéralogique et chimique d'un calcaire argileux des Combes.

L'échantillon (lame 1171) provient du banc appelé « pierres argileuses » de la galerie souterraine de Lachal aux Combes. La roche est un calcaire argileux gris foncé, de texture homogène, se brisant en fragments parallélépipédiques et se délitant dans l'eau au bout de quelques jours.

a) Examen microscopique.

La pâte calcaire fine apparaît voilée par les minéraux argileux floconneux à contours diffus. Les petits cristaux de calcite, de forme quelconque, ont une taille oscillant entre 20 et 50 µ. Lorsqu'ils sont assez gros, ils forment des agrégats bien individualisés. Les éléments clastiques sont rares : quelques grains de quartz de forme

irrégulière, anguleuse, dont la taille varie de 30 à 40 μ , sont disséminés à travers la roche. Quant aux minéraux accessoires, ils sont représentés par des sphères concrétionnées de marcassite dont la grosseur ne dépasse pas 10 μ , par de petites traînées ou plages de sesquioxydes de fer et par des cristaux de magnétite d'une cinquantaine de μ environ.

Les organismes sont surtout représentés par des Calpionelles, quelques Foraminifères et des Textularidés à test arénacé.

b) Etude aux rayons-X de la phase argileuse et détermination des minéraux argileux.

Sur la fraction argileuse extraite du calcaire des Combes, un radiogramme Debye-Scherrer (Planche I, fig. 3) a permis de calculer les écarts réticulaires suivants :

10,71 m; 7,22 f et floue; 4,48 F; 4,27 F; 3,32 TF; 2,57 F, 2,45 m; 2,27 f; 1,82 F, etc...

L'ensemble de ces raies montre la coexistence de minéraux du groupe de l'illite (60 % environ) et de la kaolinite (22 %), associés à une fraction de quartz (18 %) qui a dû échapper à la séparation lors de l'élimination de la phase détritique. En proportions absolues, il y a donc 73 % de minéraux micacés pour 27 % de kaolinite.

c) Analyse chimique de la phase argileuse et calcul de la formule des minéraux argileux.

L'analyse chimique faite de cette même fraction argileuse a donné les résultats indiqués ci-dessous en A (Analyste: N. Parjadis DE Larivière, Grenoble, 1958). La suspension à 1 % de la roche est alcaline: pH = 8,8.

	A	В
SiO ₂	57,30	52,00
$\mathrm{Al}_2\mathrm{O}_3$	24,48	24,48
e_2O_3	0,04	0,40
eO	2,65	5,00
[gO	1,72	3.40
aO	2,50	5,00
a ₂ O	0,13	0.30
20	0,65	1.30
$\overline{\mathrm{iO}}_{2}$	0,80	<u> </u>
O_2O_5	0,01	
InO	0,02	_
I_2O	10,00	6,70
Total	100,03	98,58

L'analyse recalculée de l'illite de la phase argileuse, après l'élimination, au moyen des proportions moléculaires, de la kaolinite et du quartz, est indiquée ci-dessus (B).

La formule correspondante de l'illite (Tableau I, n° 3) est :

$$(OH)_2$$
 $(Al_{1.44}$ Fe" $_{0.02}$ Fe" $_{0.28}$ Mg $_{0.26}$) $(Si_{3.50}$ Al $_{0.50}$) O $_{10}$ $(Ca-Na-K-Mg)_{0.66}$

Un silicium sur huit est remplacé en position tétraédrique par l'aluminium; la somme des ions en position intermédiaire (0,66) est un peu faible, car elle est généralement voisine de 0,80 pour les minéraux argileux micacés.

Pour 100 g de silicate déshydraté, le rapport SiO_2/Al_2O_3 est égal à 2,12 et les proportions de K_2O et MgO sont respectivement 0,90 et 2,33; la magnésie est bien silicatée puisque la roche originelle n'est pas dolomitique.

En se reportant aux diagrammes de variations de G. MILLOT (1949, p. 260-261), il est facile de s'apercevoir que 2 chiffres sur 3 sont aberrants pour une roche marine; seul le pourcentage de magnésie est correct.

Mais les variations de composition chimique de la phase argileuse reflétant les variations des mélanges minéralogiques qu'elle contient, il devient possible d'expliquer ces aberrations. En effet, les valeurs trouvées, en général, aussi bien pour la potasse que pour la magnésie et pour le rapport SiO₂/Al₂O₃ dans l'analyse de la phase argileuse des roches marines, sont d'autant plus basses que la proportion de kaolinite dans le mélange argileux est abondante.

On voit ici que l'interprétation de l'analyse chimique confirme l'indication des rayons-X, selon laquelle le pourcentage de kaolinite, dans le mélange argileux, est assez fort. Il est responsable des valeurs relativement basses trouvées.

d) Formule représentative.

Le banc de pierre argileuse des Combes contient en moyenne 54,30% de calcite et pas de dolomite (MgO = 0,1), 13,40% d'insolubles (principalement le quartz), un faible pourcentage de sels solubles dans l'eau (0,58% de SO³—), des traces de chlorures et 7,85% d'hydroxydes libres (sesquioxydes de fer et d'aluminium).

Le pH est basique : 8,8. Originellement le milieu était donc réducteur.

Le rôle du rH, potentiel d'oxydo-réduction réglant le degré d'oxydation du fer et présidant aux conditions de la vie dans le milieu, est aussi important à connaître que le pH et le complète. Ici, le fer analysé est uniquement à l'état ferreux, d'où la formation de marcassite liée à la genèse de la kaolinite; d'autre part, les solutions n'étant pas renouvelées dans ce milieu de sédimentation, les faunes benthiques ne peuvent y vivre.

L'absence de dolomite dans les calcaires argileux des Combes a été confirmée en employant la méthode de Malher de coloration sélective (C. MEGNIEN, 1957).

On peut représenter de la manière suivante le banc de « pierres argileuses » du gisement des Combes :

C, 54,30 (calc.); I, 13,40; Fe, 7,85 (marcas.); Gypse, 0,58; A, 23,87 (I >>> K).

A titre comparatif, il est intéressant de noter l'analyse de E. Gueymard sur les pierres à ciment de la Porte de France, citée par Ch. Lory (1873, p. 21), et dont les résultats sont concordants avec les nôtres :

А	rec	11	Δ	
:1	rg	11	C	

Aighe.	
SiO_2	
Al_2O_3 5,10	
$\operatorname{Fe_2O_3}$	23,70
CaO 1,70 \	•
MgO 1,00	
Carbonate de chaux	
Carbonate de magnésie	76,30
Eau, bitume, etc	
Total	100.00
rotal	100,00

4. Conclusion.

D'après les études antérieures, le milieu de genèse des calcaires argileux du Berriasien a été défini comme celui d'une mer peu profonde, littorale, vaseuse, où les bancs calcaires alternant avec les bancs plus argileux, indiquent un rythme de sédimentation attribué à la proximité ou à l'éloignement du rivage plutôt qu'à la profondeur des eaux. L'étude de leur phase argileuse permet d'ajouter, en se référant aux courbes de fréquence et aux diagrammes de variation établis par G. Millot, que les conditions de sédimentation équivalaient, dans ces eaux alcalines tranquilles, à celles d'une vase argilo-calcaire; ce milieu était assez anaérobie pour permettre la genèse des sulfures liée à celle de la kaolinite, d'où les teneurs, relativement faibles pour une série marine, que nous avons trouvées pour la potasse et la magnésie.

IV. GISEMENT SENONIEN DE SASSENAGE

1. Géologie du gisement.

C'est dans la base des calcaires sénoniens, bien caractérisés au-dessus des Côtes de Sassenage, qu'ont été ouvertes d'importantes carrières destinées autrefois à produire de la chaux hydraulique et qui, à l'heure actuelle, fournissent la pierre pour le ciment artificiel.

Les bancs exploités sont des calcaires bien stratifiés, à grain fin et de teinte claire; ils se présentent sous forme de « lauzes », c'està-dire de dalles superposées d'épaisseur variable, depuis quelques décimètres jusqu'à 1 m et 1,5 m. Leur inclinaison est de 15 à 20° cn direction de l'Est.

Il y a encore une dizaine d'années, ces lauzes étaient exploitées à Seyssinet, par la Société des Ciments de la Porte de France, pour la chaux hydraulique. La pierre était plus jaunâtre et compacte que celle extraite des carrières des Côtes de Sassenage; d'ailleurs, les bancs exploités appartenaient à un niveau géologique un peu plus élevé, dans la même série de couches.

Aux Côtes de Sassenage, les carrières, visibles de la route de Sassenage à Villard-de-Lans, se présentent comme d'immenses entonnoirs aux parois en gradins sur lesquels la pierre, abattue par les mines, est traînée vers l'orifice d'un puits débouchant à l'extrémité de la galerie A.V.C. 7 qui aboutit à l'usine de broyage de Sassenage.

Une coupe de la carrière de Sassenage par le travers-bancs A.V.C. a permis de noter l'épaisseur et la teneur des bancs exploités :

- 1) De haut en bas, et sur 17 m d'épaisseur, on rencontre des calcaires à grain fin, ayant comme teneur, de 78 à 83 % de carbonate de chaux : « chaux des Grands Rochers »;
- 2) Puis, pendant une douzaine de mètres, d'autres calcaires, mais à teneur plus faible, environ 78 % : « chaux de la Croix de Fer »:
- 3) Ensuite, 21 m de calcaires à grain « gréseux » et à très forte teneur en carbonate de chaux : 86,3 % de moyenne : « Grès »:
- 4) Et enfin de nouveau des bancs de calcaires à grain fin, de 13, 15 et 16 m d'épaisseur, et à pourcentage variable compris entre 73 et 83 %.

⁷ A.V.C. sont les initiales des trois premiers exploitants de ces carrières : MM. ARNAUD, VENDRE et CARRIÈRE.

Autrefois, seuls les bancs à 76 % étaient utilisés pour la fabrication de la chaux : les bancs à 80 % et au-dessus étaient vendus comme moellons pour la construction. Actuellement, pour la fabrication du ciment artificiel, qui se fait à l'usine de Saint-Robert, on part de pierres ⁸ ayant diverses origines et des teneurs variables en carbonate de chaux.

2. Etude micrographique de quelques échantillons.

Un travers-bancs de 400 m environ, ayant son origine dans la carrière A.V.C. aux côtes de Sassenage, et tracé suivant la ligne de plus grande pente des bancs, permet d'échantillonner facilement les différentes assises du Sénonien supérieur.

Il s'agit là d'une alternance de bancs calcaires tantôt à grain fin, tantôt à grain gréseux.

Les trois premières coupes (lames 1158-1159-1160) faites à différents niveaux dans la partie supérieure des « lauzes », correspondent à des calcaires clairs à pâte fine, cryptocristalline. Les éléments détritiques sont assez abondants : il s'agit surtout de quartz en plages de taille variable; plus rarement on rencontre des débris d'une roche composée de quartz et de biotite; la glauconie détritique est assez fréquente; les débris calcaires, sans doute d'origine organique, sont de petite taille.

⁸ Ces pierres, après avoir été concassées et passées au granulateur, sont mélangées de telle manière que l'ensemble titre environ 82 à 83 % de carbonate de chaux; mais la teneur en carbonate n'est pas la seule qui doive être régularisée; celles en silice et en alumine sont également importantes : les qualités d'un ciment variant beaucoup suivant qu'il est siliceux ou alumineux.

La pierre granulée est alors broyée à l'eau et transformée en pâte liquide, qui est disposée dans de très grands silos, contenant 1 000 tonnes et plus, où la boue est maintenue en suspension à l'aide d'injections d'air comprimé ou d'agitateurs qui en opèrent le brassage et l'homogénéisation. Suivant les teneurs constatées par le laboratoire, plusieurs silos sont réunis pour former un silo de matière prête à la cuisson, ayant la teneur exacte souhaitée. Cette boue est alors acheminée par une goulotte inclinée vers la partie haute du four tournant. Ce dernier est constitué par un cylindre de 80 à 100 mètres de longueur, et 3,50 m de diamètre, incliné de quelques degrés sur l'horizontale. A son extrémité la plus basse est disposé un énorme chalumeau à charbon pulvérisé donnant une flamme d'une quinzaine de mètres de longueur. La boue, arrivant à l'extrémité supérieure, se dessèche d'abord, se divise en boulettes de la grosseur d'une noisette, jusqu'à la hauteur du chalumeau où elle est soumise directement à la flamme et portée à 1 200° environ, ce qui la « klinckerise », c'est-à-dire la transforme en un produit semi-vitreux. A l'extrémité inférieure du four, ces klinckers passent dans un refroidisseur d'où leur chaleur est transmise à l'air qui alimente le chalumeau. Après repos dans un hall de stockage, les klinckers sont repris, broyés et conduits au silo d'expédition.

Les organismes benthiques sont représentés par des fragments de Bryozoaires, très nombreux au début, puis de moins en moins fréquents; une forte proportion de spicules de Spongiaires, de Rotalidés calcaires et de rares Miliolidés indéterminables. Quant aux formes pélagiques, ce sont surtout des Gümbélinidés, associés à quelques Globigérinidés et Globotruncana se rapportant à l'espèce Globotruncana lapparenti tricarinata (Planche II, fig. 4).

La coupe suivante (lame 1161) est un calcaire à structure finement granuleuse, caractérisé par l'abondance de débris de Bryozoaires auxquels s'ajoutent Rotalidés et Miliolidés, ainsi que quelques restes d'algues calcaires. Les fragments de quartz et la glauconie sont épars dans un ciment clair et fin, renfermant de nombreuses Globigérinidés et Gümbélinidés.

Malgré l'abondance des minéraux détritiques et des débris, cette roche n'est pas un grès à proprement parler, car sa nature n'est pas siliceuse : en effet, l'analyse chimique révèle un pourcentage de carbonate de chaux d'environ 86. Il est donc plus juste de parler de calcaire littoral détritique à faciès très légèrement gréseux.

De nouveau, après ces calcaires à faciès gréseux, on trouve une succession de bancs calcaires à pâte très fine. Une coupe faite dans l'un d'eux (lame 1162) indique la disparition complète de la glauconie et du quartz détritiques. C'est une formation uniquement pélagique, où les débris d'organismes sont très réduits (fragments de Bryozoaires). Le ciment contient quelques Foraminifères : Gümbélinidés, Lagénidés et Globotruncana tricarinata, associés à de rares spicules de Spongiaires (en section le plus souvent).

3. Etude minéralogique et chimique d'un calcaire à grain fin.

Prélevé dans la carrière des Grands Rochers, aux Côtes de Sassenage, l'échantillon correspond au sommet des « lauzes » (lame 1158). C'est un calcaire clair, à pâte fine, ne se délitant pas dans l'eau et de texture homogène.

a) Examen microscopique.

La phase argileuse apparaît presque entièrement masquée par la calcite cryptocristalline; les autres granules de calcite monocristalline ont de 25 à 50 μ . Le quartz détritique abonde en plages régulières de taille comprise entre 150 et 500 μ et à extinction souvent onduleuse; l'une d'elles, de plus d'un millimètre, contient des

fragments de biotite non altérée. Quant au quartz de néoformation, il a cristallisé en auréole autour de noyau de calcite. Le minéral accessoire le plus important est la glauconie authigène, en grains ne dépassant pas $150~\mu$. Les autres minéraux : marcassite et magnétite, forment de petites mouchetures peu abondantes ayant au maximum une quinzaine de μ . Les sesquioxydes de fer sont en quantité négligeable.

Les fragments de Bryozoaires, Rotalidés calcaires, spicules d'Eponges et quelques Milioles représentent la faune benthique; la faune pélagique est beaucoup moins importante (Globigérines et Gümbélines).

b) Etude aux rayons-X de la phase argileuse et détermination des minéraux argileux.

Un diagramme de rayons-X (Planche I, fig. 4) réalisé à partir d'une fraction fine de la phase argileuse, isolée de ce calcaire sénonien, permet de calculer les équidistances réticulaires suivantes :

4,48 m; 4,27 F; 3,85 tf; 3,35 TF; 2,57 f et floue; 2,45 m; 2,23 m; 1,82 F; 1,53 F, etc...

On remarque ici, comme pour l'argile berriasienne, les raies caractéristiques de l'illite, mais celles de la kaolinite n'apparaissent pas; quant aux dernières équidistances mesurées à 1,82, 1,53 et 1,37, elles correspondent à une fraction cryptocristalline de quartz équivalente à 50 % de l'ensemble.

Les minéraux micacés forment donc la totalité de l'argile: l'absence de structure kaolinique peut s'expliquer par le fait qu'on a affaire ici à une sédimentation en milieu marin riche en cations Ca, ce qui oriente préférentiellement les minéraux argileux vers une structure micacée dominante.

c) Analyse chimique de la phase argileuse et calcul de la formule des minéraux argileux.

La composition chimique de la phase argileuse révèle les pourcentages d'oxydes indiqués ci-dessous en A (Analyste: N. Parjadis de Larivière, Grenoble, 1958). Le pH de la suspension à 1 % est 7,5.

	A	В
SiO ₂	77,60 7,30 1,70 0,02 1,08 2,60 0,07	51,40 15,50 3,00 0,70 2,40 5,70 0,20
K ₂ O TiO ₂ P ₂ O ₅ MnO H ₂ O	0,54 0,26 0,01 0,01 9,20	1,10 — — — — 19,00
Total	100,39	99,00

Après avoir attribué, au moyen des proportions moléculaires, les pourcentages d'oxydes nécessaires à la formation d'un réseau micacé, il devient possible d'éliminer la silice restante et de ramener les chiffres à 100 g de silicate, afin d'obtenir la composition chimique de l'illite. Cette analyse recalculée est indiquée ci-dessus en B.

Cette illite a pour formule (Tableau I, n° 4):

$$(OH)_2$$
 $(Al_{1,29}$ Fe"_{0,17} Fe"_{0,40} Mg_{0,27}) $(Si_{3,90}$ Al_{0,10}) O₁₀ $(Ca-Na-K)_{0,61}$

Il y a un déficit de la somme des ions placés en position octaédrique (1,77) par rapport au chiffre théorique qui est 2. Il existe seulement 0,61 ion en position intermédiaire. L'augmentation de la quantité de Si en position tétraédrique (3,90) et la diminution de la somme des cations en position octaédrique doivent être attribuées aux impuretés, quartz surtout, qui se sont trouvées mêlées à la phase argileuse et dont l'élimination n'a pas dû être complète lors du calcul théorique de la composition chimique de l'illite.

Le rapport SiO₂/Al₂O₃ pour 100 g de silicate déshydraté est égal à 3,30, ce qui est normal pour une roche marine; il caractérise, d'autre part, les minéraux argileux micacés. La proportion de potasse sèche est de 1,20, celle de magnésie de 2,50. Le milieu de genèse n'est donc ni très magnésien, ni très potassique.

d) Formule représentative.

Cet échantillon de calcaire sénonien contient, en moyenne, 79 % de calcite et pratiquement pas de dolomite (MgO = 0.18 %), 11 % d'insolubles, une très faible quantité de fer (0.70 %, calculé en sesquioxydes), des traces de gypse (0.30 %) et de sulfate.

Le pH est peu alcalin: 7,5. La sédimentation de ces calcaires s'est donc faite dans des conditions voisines de la neutralité. D'autre part, le milieu de genèse n'est pas favorable à la précipitation de sulfure de fer, puisqu'il n'est pas réducteur; il explique, au contraire, l'abondance de la glauconie, exigeant pour sa néoformation un cation fer trivalent. Ces conditions, associées à la présence dans ce milieu de nombreux cations divalents, font que la genèse de la kaolinite se trouve bloquée au profit d'une formation uniquement micacée.

La méthode de coloration sélective calcite-dolomite a permis de déceler, dans une plaque mince, quelques petits cristaux incolores de dolomite, confirmant ainsi le faible pourcentage de magnésie trouvé à l'analyse.

La formule représentative de ce banc de « lauzes » sénoniennes, en reprenant les mêmes dénominations utilisées plus haut, est la suivante :

C, 79 (calc. et dol.); I, 11,00; Fe, 0.7 (sesq.); gypse, 0,30; A, 9 (I).

4. Conclusion.

Le milieu de genèse des « lauzes » sénoniennes est celui d'une mer certainement profonde (condition principale à la survivance des organismes benthiques), faiblement alcaline, aérée et agitée par des courants responsables de l'importance des éléments clastiques et des débris d'organismes. Ces conditions, jointes au fait qu'il existait, dans ce milieu, de nombreux cations divalents, ont bloqué la genèse de la kaolinite. Les conditions de sédimentation correspondent à l'évolution d'une boue très calcaire, en milieu faiblement oxydant. Ces conditions confirment, en les précisant du point de vue physico-chimique, celles obtenues par N. Roubichou dans son « étude micrographique du Crétacé supérieur du Vercors » (1956) : à la mer très agitée de l'Albien-Turonien fait place, dans le Vercors, une mer plus calme, augmentant progressivement de profondeur et encore troublée par des courants au Campanien supérieur.

CONCLUSIONS GENERALES

Les tableaux ci-dessous résument les principaux résultats de cette étude :

1° Composition globale des 4 échantillons étudiés :

	Lias	Rauracien	Berriasien	Sénonien
Phase carbonatée	71,50	56,00	54,30	79,00
Insolubles	1,80	10,20	13,40	11,00
Sels de Fer	2,20	3,32	7,85	0,70
Gypse	0,64	0,54	0,58	0,30
Phase argileuse	23,86	29,94	23,87	9,00

2° Nature et pourcentages des minéraux de la phase argileuse :

	Illite	Kaolinite
Lias de Pont-du-Prêtre	76	24
Rauracien de Genevray	94	6
Berriasien des Combes	73	27
Sénonien de Sassenage	100	

3° Variations de la composition chimique de la phase argileuse :

Poids de potasse et de magnésie pour 100 g de silicates déshydratés et rapport SiO₂/Al₂O₃.

	K ₂ O % sec.	MgO % sec.	SiO_2/Al_2O_3
Lias	3,54	0,94	3,07
Rauracien	2,56	2,31	2,82
Berriasien	0,90	2,37	2,12
Sénonien	1,20	2,50	3,30

Les résultats exposés ci-dessus permettent de déduire un certain nombre de faits intéressants, en ce qui concerne les conditions de sédimentation.

Dans son étude sur les roches argileuses sédimentaires, G. MILLOT (1949, p. 253) constate que les conditions de sédimentation sont très variables pour un même milieu de genèse, et ajoute, pour les roches d'origine marine : « Il semble que la forte teneur

en carbonates fait augmenter la proportion de minéraux micacés. Celle-ci varie de 70 à 100 %. Que la forte teneur en pyrite, qui caractérise les roches nées en milieu réducteur, augmente la proportion de kaolinite. »

D'autre part, dans ses récentes recherches sur l'origine des minéraux des sédiments marins, A. Rivière (1954, p. 468) souligne que R. S. Dietz, analysant les vases marines draguées par le Challenger, constata « que la kaolinite domine seulement dans les échantillons recueillis près du rivage. Par contre, l'illite est le minéral abondant des sédiments des zones profondes »; il en conclut donc que l'illite est une argile de néoformation à partir d'un apport détritique en provenance des zones marginales de la mer et du continent.

En s'aidant de ces déductions, ainsi que des résultats obtenus au cours de cette étude, il a été possible de mieux préciser les conditions de sédimentation de chacune de nos roches.

- 1) Lias de Pont-du-Prêtre. Roche très calcaire, correspondant à l'évolution d'une vase calcaire sulfureuse, dans une mer relativement profonde, réductrice (pH = 9) et potassique.
- 2) Rauracien de Genevray-de-Vif. Dépôt argilo-calcaire, dans une mer peut-être littorale et tranquille (6 % de kaolinite seulement), mais oxydante (pH = 6,8), d'où une très faible tendance à la formation des sulfures, altérés ultérieurement en sesquioxydes, et à celle de la kaolinite.
- 3) Berriasien des Combes. Alternance de bancs plus ou moins calcaires. L'échantillon étudié, peu calcaire par rapport aux bancs sus-jacents, peut être rapproché de l'échantillon du Lias de Pont-du-Prêtre. Ils sont semblables sur plusieurs points : à peu près les mêmes pourcentages d'illite et de kaolinite dans la phase argileuse; pH très voisins et basiques. Cependant, leur composition chimique globale est très différente; c'est que les conditions de sédimentation de la roche du Berriasien sont celles d'une vase argilo-calcaire très riche en matières organiques et en sulfures (pH = 8,8), dans une mer littorale et anaérobie, ce qui explique la plus forte teneur en kaolinite, trouvée dans nos échantillons.
- 4) Sénonien de Sassenage. Ce dépôt correspond à une boue très riche en calcaire, sédimentée dans une mer pratiquement neutre (pH = 7,5), assez profonde, mais agitée de courants sous-marins (favorables à la peroxydation du fer et à la genèse de la glauconie) et où la présence de cations divalents, de même que la profondeur des eaux, déterminèrent la seule néoformation d'un minéral riche en silice du type mica.

On pourra nous objecter que ces reconstitutions de milieux de sédimentation sont très hypothétiques, par exemple parce que le pH a pu varier au cours du vieillissement du sédiment, ou parce qu'il est très difficile de distinguer, dans la phase argileuse d'une roche sédimentaire, la partie détritique de la partie néoformée qui, seule, permet — grâce à l'étude physico-chimique — de tirer des déductions intéressantes. En ce qui concerne le pH, la plupart des auteurs s'accordent sur le fait que la valeur obtenue à partir d'une roche argileuse, si elle n'est pas rigoureusement identique à celle du sédiment originel, donne cependant une indication assez précise sur cette dernière, les sels minéraux qui se trouvaient en équilibre dans la vase ayant donné naissance à une certaine association de minéraux qui redonnent un équilibre analogue après remise en solution prolongée. Quant à la seconde objection, nous dirons seulement que nous avons choisi nos roches dans un ensemble régional particulièrement bien étudié au point de vue de la stratigraphie, de la paléogéographie et de la paléontologie (M. Gignoux et L. Morer, 1952; L. Moret, 1952; N. Roubichou, 1956, etc.); ces études antérieures permettaient, dans chacun des cas ici étudiés, d'avoir déjà une idée assez nette du milieu de sédimentation correspondant: il se trouve que nos résultats confirment toujours, en les précisant notablement, les conclusions antérieures obtenues par d'autres méthodes : nous voulons y voir autre chose qu'une coïncidence beureuse.

BIBLIOGRAPHIE

- GIGNOUX (M.) et MORET (L.) (1952. Géologie dauphinoise, 2e édition, Paris, 384 p.
- Lory (Ch.) (1873). Notice géologique et chimique sur les pierres propres à la fabrication des chaux hydrauliques et des ciments, dans le département de l'Isère et autres départements de la région des Alpes. Grenoble, 24 p.
- MEGNIEN (C.) (1957). Différenciation calcite-dolomite et anhydrite-gypse par coloration sélective sur échantillons macroscopiques (B.S.G.F. [6], t. VII, p. 27-29).
- MILLOT (G.) (1949). Relation entre la constitution et la genèse des roches sédimentaires argileuses (Rev. Géol. app. Prosp. Min., Nancy, t. II., n°° 2, 3, 4, 352 p.). Moret (L.) (1952). — Une coupe du «bord subalpin» au Nord de Grenoble :
- succession de faciès lithologiques (A.F.A.S., p. 290).
- RIVIÈRE (A.) et VISSE (L.) (1954). L'origine des minéraux des sédiments marins (B.S.G.F., [6], tt. IV, p. 467-474).
- Roubichou (N.) (1956). Etude micrographique du Crétacé supérieur sur la bordure Nord du massif du Vercors (T.L.G.G., t. XXXIII, p. 157-206).

Calcul de la formule des Illites.

 $(K=Nombre\ de\ valences\ électronégatives/nombre\ de\ valences\ électropositives).$

Nombre d'atomes par couche	Couche Tétraédrique	4	Couche Octaédrique	1.69	2,00
Formule	Si = 3,49 Si = 3,49 Si = 3,50 Si = 3,50	A1 = 0.51 $A1 = 1,25$ $A1 = 0.51$ $A1 = 0.51$	A1 = 0.50 $A1 = 1.44$ $A1 = 0.10$ $A1 = 1.29$	Fe'''= 0,30 Fe'''= 0,28 Fe'''= 0,02 Fe'''= 0,17	Fe" = 0,01 Fe" = 0,02 Fe" = 0,28 Fe" = 0,04
Nombre d'atomes de cations pour 22 valences	3,49 3,49 3,50 3,90	1,76	1,94	0,30 0,28 0,02 0,17	0,01 0,02 0,28 0,04
Coeffic. K 22 4,9764 5,2646 5,4516 4.8246	4,40 4,16 4,03 4,56	4,40	4,03	4,40 4,16 4,03 4,56	4,40 4,16 4,03 4,56
Nombre de valence + pour 100 g	3,1732 3,3600 3,4680 3,4240	1,1820	1,4400	0,2058 0,2058 0,0150 0,1128	0,0076 0,0110 0,1390 0,0194
Valence du cation	4	ଟ	9	က	64
Nombre d'atomes pour 100 g	0,7933 0,8400 0,8670 0,8560	0,3940	0,4800	0,0686 0,0686 0,0050 0,0376	0.0038 0,0055 0,0695 0,0097
Nombre de cations dans les oxydes	1	6	N	87	1
Nombre de molécules d'oxydes pour	0,7933 0,8400 0,8670 0,8560	0,1970	0,2400	0,0343 0,0343 0,0025 0,0188	0,0038 0,0055 0,0695 0,0097
Poids molé- culaire	09	60	701	160	72
culée)	47,60 50,40 52,00 51,40	20,00	24,48	5,50 5,50 0,40 3,00	0,28 0,40 5,00 0,70
Pourcentages (Analyse recalculée)	SiO ₂		Al <u>2</u> 03	Fe ₂ 0 ₃	FeO
(A n:	1 1 1 1 1	I	II A	1 III III II	III IIII IV

	Couche intermédiaire	0,98 0,76 0,66	0,61	Ago,08)
Mg = 0,13 Mg = 0,31 Mg = 0,26 Mg = 0,08 Mg = 0,07	Ca = 0.40 Ca = 0.37 Ca = 0.36 Ca = 0.46	Na = 0,16 Na = 0,07 Na = 0,09 Na = 0,03	K = 0,42 K = 0,32 K = 0,13 K = 0,12	(OH) ₂ (Al _{1,25} Fe"", o, 30 Fe" o, 01 Mg _{0,13}) (Si _{3,49} Al _{0,51}) O ₁₀ (Ca _{0,40} Na _{0,16} K _{0,42}) (OH) ₂ (Al _{1,23} Fe"", o, 28 Fe", o, 22 Mg _{0,31}) (Si _{3,49} Al _{0,51}) O ₁₀ (Ca _{0,37} Na _{0,07} K _{0,32}) (OH) ₂ (Al _{1,44} Fe"", o, 27 Fe", o, 38 Mg _{0,26}) (Si _{3,50} Al _{0,50}) O ₁₀ (Ca _{0,36} Na _{0,09} K _{0,12}) (OH) ₂ (Al _{1,79} Fe"", o, 17 Fe", o, 04 Mg _{0,27}) (Si _{3,90} Al _{0,10}) O ₁₀ (Ca _{0,46} Na _{0,08} K _{0,12})
0,13 0,31 0,34 0,27	0,40 0,37 0,36 0,46	0,16 0,07 0,09 0,03	0,42 0,32 0,13 0,12	Cao,40 Ni Cao,37 Ni Cao,36 Ni Cao,46 Ni
4,40 4,16 4,03 4,56	4,40 4,16 4,03 4,56	4,40 4,16 4,03 4,56	4,40 4,16 4,03 4,56	54) O ₄₀ (54) O ₄₀ (55) O ₄₀ (10) O ₄₀ (
0,0614 0,1500 0,1700 0,1200	0,1946 0,1824 0,1790 0,2038	0,0424 0,0192 0,0096 0,0064	0,1094 0,0784 0,0310 0,0262	Si _{3,49} Al ₀ Si _{3,49} Al _{0,} Si _{3,50} Al _{0,} Si _{3,50} Al _{0,}
67	8	1	1	Mg _{0,13}) (5
0,0307 0,0750 0,0850 0,0600	0,0973 0,0912 0,0895 0,1019	0,0424 0,0192 0,0096 0,0064	0,1094 0,0784 0,0310 0,0262) Fe'0,01 Fe'0,02 Fe'0,38
-	1	62	Ø	,25 Fe'''0,38 23 Fe'''0,28 44 Fe'''0,01
0,0307 0,0750 0,0850 0,0600	0,0973 0,0912 0,0895 0,1019	0,0212 0,0096 0,0048 0,0032	0,0547 0,0392 0,0155 0,0131	H) ₂ (Al ₁ , H) ₂ (Al ₁ , H) ₂ (Al ₁ ,
40	56	62	28	:
1,23 3,00 3,40 2,40	5,45 5,15 5,00 5,70	1,32 0,60 0,30 0,20	4,60 3,30 1,30 1,10	Formules des Illites I Pont du Prêtre II Genevray-de-Vif III Les Combes: IV Sassenage:
MgO	Ca0	Na ₂ 0	$ m K_2O$	Formules des Il. I Pont du I. II Genevray- III Les Comb
I III III III	1 III A	1 III III II I	1 11 111 17	