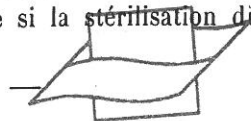


existent toujours dans ce liquide. Il est bon d'enfermer le sang aseptique dans les tubes scellés, en laissant une chambre d'air, si l'on veut être sûr de conserver la matière rouge à l'état d'oxyhémoglobine.

Au contraire, le sang non stérilisé peut être scellé avec vingt, cinquante, etc. fois son volume d'air. L'oxygène finit toujours par disparaître dans ce cas, et l'hémoglobine se réduit entièrement.

L'épreuve de la réduction spontanée constitue un excellent moyen de reconnaître si la stérilisation du sang a réussi ou non.



Vlaams Instituut voor de Zee
Flanders Marine Institute

Notice sur les cristaux de Phillipsite des sédiments du centre de l'océan Pacifique. Première partie, par A.-F. Renard, correspondant de l'Académie.

Les résultats généraux de ce travail ont été publiés il y a quelques années déjà (1); depuis, nous avons soumis à l'étude de nouveaux matériaux et contrôlé nos premières

(1) La première communication relative à ces cristaux zéolithiques a paru dans le *Report of the British Association for the Advancement of Science*, session de Sheffield 1877; d'un autre côté nous avons décrit sommairement ces zéolithes dans le travail publié en collaboration avec M. Murray dans les *Proc. Roy. Soc. of Edinburgh 1884*, *On the Nomenclature, Origin and Distribution of Deep-sea Deposits*. — Cette notice préliminaire est destinée à paraître avec des développements dans le mémoire, sur les sédiments océaniques que je publie avec M. Murray. Je tiens à dire que c'est mon collaborateur qui, le premier, a découvert ces cristaux microscopiques, dont il m'a confié la détermination et la description.

recherches par des méthodes d'observation plus exactes qui ont confirmé les conclusions que nous avons annoncées. Nous croyons pouvoir publier aujourd'hui une notice plus détaillée sur un des phénomènes remarquables de la période géologique actuelle : nous voulons parler de la sédimentation qui s'opère dans l'océan Pacifique, de matières argileuses caractérisées par la présence, en nombre immense, de silicates hydratés, cristallisés en place dans les vases sous-marines. On peut évaluer que ce dépôt s'étale au fond des mers, sur une aire à peu près aussi étendue que celle de la moitié du continent européen. Ce n'est pas seulement cette grande extension du dépôt et l'uniformité frappante que prêtent ces petits cristaux aux sédiments du centre du Pacifique, qui doivent attirer notre attention; mais la présence, dans cette vase, de minéraux zéolithiques formés à l'état libre et nettement cristallisés, présente un des faits les plus instructifs pour l'étude des réactions chimiques qui se passent sur le fond des grands océans. Ces réactions se traduisent, dans le cas dont nous allons nous occuper, par la formation, au sein des matières argileuses, de cristaux de phillipsite de dimensions microscopiques. Ces cristaux constituent une partie considérable de la vase, à tel point que pour certains sondages on peut évaluer qu'ils s'élèvent de 20 à 30 % du sédiment. Un fait intéressant et qui prouve combien ces zéolithes sont nombreuses dans la vase, c'est que les foraminifères arénacés, que la drague rapporte de ces profondeurs, ont leurs enveloppes presque entièrement constituées par ces microlithes.

C'est toujours de profondeurs qui dépassent des milliers de mètres et de points situés à de très grandes distances de côtes continentales, que la drague ou la sonde ramènent

ces vases à zéolithes qui constituent la formation la plus caractéristique des grands bassins marins. Elle n'avait pas été signalée avant qu'on soumit à l'étude les sédiments dragués dans le Pacifique par l'expédition du « Challenger ». Plus récemment, des recherches faites sur des sédiments de l'océan Indien recueillis par les navires de l'amirauté anglaise, ont démontré que des dépôts analogues se forment aussi dans les régions profondes de cet océan (1). La cristallisation de ces zéolithes dans les matières argileuses des fonds marins se rattache intimement, comme nous le ferons voir, aux phénomènes d'altération des matières volcaniques de nature basique étalées sur le lit des grandes mers actuelles, et qui se traduisent par la formation de l'argile rouge et des nodules manganésifères et ferrifères, toujours présents quand on observe des zéolithes libres dans les sédiments.

Ce qui frappe aussi dans l'étude de ces cristaux formés dans les argiles marines, c'est la manière d'être toute spéciale qu'ils y affectent. Nous connaissons ces minéraux, et la phillipsite en particulier, dans les boursoffures, les fissures et les vides de certaines masses cristallines ou tuffacées; on les avait même signalés exceptionnellement dans quelques roches sédimentaires, et l'on sait qu'une des plus brillantes découvertes de Daubrée a été de montrer des zéolithes en voie de formation dans les briques et le béton romain des sources de Plombières, et aux abords d'autres sources thermales. Mais on ne les avait jamais

(1) Voir J. MURRAY, *On marine Deposits in the Indian, Southern, and Antarctic Oceans*. *Scottish Geographical Magazine*, août, 1889, p. 41.

trouvées, peut-on dire, à l'état isolé, en cristaux simples ou maclés et en agrégats radiés libres; on ne les avait jamais constatées avec une telle abondance dans un dépôt marin que dans les sédiments du Pacifique. Nous dirons plus : ces sédiments à zéolithes se présentent ici avec un ensemble de phénomènes qui paraîtraient ne s'être jamais réalisés, sur la même échelle, dans les formations sédimentaires des périodes géologiques, à moins d'admettre que leur trace ait été entièrement effacée par des actions postérieures au dépôt.

Nous aurons à nous occuper plus loin de la distribution géographique et bathymétrique des sédiments à zéolithes et des conditions spéciales de leur gisement. Bornons-nous ici à indiquer qu'on les a découverts dans les produits de tous les sondages, depuis les îles Hawaï jusqu'au sud des îles Basses. Les cristaux de phillipsite y sont cantonnés dans les *argiles rouges*, plus rarement dans les *vases à radiolaires*, et plus rarement encore dans les *vases à globigérines*; dès qu'on s'approche des côtes continentales, les zéolithes n'apparaissent plus dans les sédiments.

Lorsqu'on soumet aux forts grossissements du microscope les sédiments dragués sur la ligne qui unit les îles Sandwich à l'archipel des îles Basses dans la région à zéolithes, on voit, au milieu des matières minérales argileuses et des débris de nature volcanique, une infinité de petits prismes de forme nette, revêtus généralement d'un enduit jaunâtre. Ces microlithes apparaissent aussi nombreux que les petits cristaux de rutile dans certains phyllades. Ces cristaux zéolithiques sont généralement simples et isolés; d'autres, qui doivent se rapporter à la même espèce, diffèrent surtout des plus petits parce qu'ils

forment souvent des agrégats ou qu'ils sont maclés; enfin, on observe aussi des groupements sphérolithiques où plusieurs de ces cristaux de zéolithes viennent s'enchevêtrer pour former des globules cristallins que nous décrirons plus loin. Ces globules sont assez grands pour qu'on les distingue à l'œil nu; par leur présence, ils donnent un caractère légèrement arénacé au sédiment.

Faisons connaître d'abord l'aspect sous lequel se montrent les cristaux isolés de très petites dimensions qui abondent et flottent dans le liquide, lorsqu'on décante les matières argileuses du sédiment. Ces microlithes sont enduits d'une couche très mince d'hydrate de manganèse et de fer qui les colore en brun ou en jaune. Pour mieux observer leur forme et leurs caractères propres, on peut les traiter avec un acide fortement étendu. On les débarasse ainsi plus ou moins parfaitement des substances qui les recouvrent. Lorsqu'ils sont décapés, les plus petits de ces cristaux apparaissent incolores, légèrement opalins ou laiteux. Ils ont une forme prismatique très prononcée. Un grand nombre de mesures micrométriques leur assigne en moyenne $0^{\text{mm}},025$ de longueur sur $0^{\text{mm}},005$ de largeur. Ces cristaux apparaissent avec des formes très simples. Les faces allongées, qu'on pourrait prendre pour des faces de la zone prismatique, font entre elles un angle droit; on les dirait terminées aux deux extrémités par deux faces simulant un dôme et inclinées l'une sur l'autre sous un angle très voisin de 120° . Il est assez difficile de bien discerner les faces qui terminent ces petits cristaux. On observe avec certitude celles qu'on vient d'indiquer, mais il se peut aussi que les plus petits microlithes de phillipsite soient, au moins pour certains d'entre eux, terminés par quatre faces au lieu de deux à chaque extrémité. On voit,

en effet, aux deux bouts du cristal, qui paraissent comme estompés, des traces de deux autres faces, mais trop peu définies pour pouvoir constater nettement leur existence. Toutefois, ces quatre faces existent en fait sur des individus plus grands, comme nous le dirons tout à l'heure. Si, comme l'ensemble des caractères physiques et les résultats des analyses nous l'indiquent, ces microlithes doivent se rapporter à la phillipsite, voici comment on doit considérer leur forme: ce seraient des cristaux simples du système monoclinique présentant les faces $(001)(c)$ $(010)(b)$ $(110)(m)$, allongés suivant l'arête c/b , allongement qui détermine la forme prismatique du cristal; les faces qui ont l'apparence de former un dôme sont celles du prisme (m) vertical. L'angle de 120° que font entre elles les deux faces m/m répond, à quelques minutes près, à l'angle des mêmes faces pour la phillipsite. Nous aurions donc ici les formes principales de ce minéral, et nous aurions affaire, au moins pour les plus petits de ces microlithes, à des cristaux non maclés. Ces cristaux simples n'ont pas encore été signalés aux échantillons de cette espèce, tels qu'on les trouve dans les géodes ou les fissures des roches volcaniques. Malgré leur extrême ténuité, on peut faire miroiter les faces b et c ; ceci montre que ces cristaux ne sont pas lamellaires, comme on pourrait le penser à première vue, mais qu'ils offrent un développement presque égal pour b et pour c . Les essais qui ont été tentés pour étudier leurs propriétés optiques, qu'il est d'ailleurs bien difficile d'établir même sur de plus grands cristaux, n'ont pas donné de résultats certains. On sait que les constantes optiques pour la phillipsite sont assez variables et que, comme pour la plupart des minéraux du groupe des zéolithes, les teintes de polarisation chromatique sont

d'ordre peu élevé. Ce qui, dans notre cas, rend cette détermination particulièrement difficile, c'est l'absorption de la lumière par les appareils optiques, lorsqu'on doit observer entre nicols avec de forts grossissements; enfin, l'angle d'extinction de la phillipsite est relativement petit et l'on n'a pas de point de repère assuré sur une arête mesurant à peine quelques centièmes de millimètre.

Lorsque les dimensions des cristaux augmentent, on peut constater quelquefois qu'ils offrent aux deux extrémités un pointement formé par quatre faces en losange, reposant sur l'arête *c/b*. Ils se montrent alors avec le facies de prismes orthorhombiques terminés par les faces d'une pyramide. En tenant compte de ce que nous avons dit plus haut de la détermination des faces, nous avons affaire, dans ce cas, à l'une des macles croisées de la phillipsite, le plan d'hémitropie étant la face *c*. Nous devons ajouter que cette forme maclée n'a pas été jusqu'ici signalée à l'état isolé, sauf dans le cas des petits cristaux de phillipsite du célèbre gisement de Plombières, où M. Des Cloizeaux a décrit des formes identiques à celles que nous indiquons.

On voit ces cristaux de petites dimensions passer par toutes les transitions de grandeur à des individus plus volumineux, simples ou maclés comme les premiers, et qui montrent une tendance à se grouper irrégulièrement, ou d'après une loi cristallographique. Déjà sur les plus petits microlithes dont nous avons parlé jusqu'ici et qui passent avec les premiers produits de la décantation des argiles, on peut constater qu'ils se superposent, s'accollent, s'enchevêtrent et s'entre-croisent. Dans certains cas, ces groupements sont réguliers; ce sont des macles en croix rappelant parfaitement la macle bien connue de l'harmitome, commune à ce minéral et à la phillipsite. Cette macle en

croix, qui se répète avec tant de fréquence, est si caractéristique qu'elle pourrait, presque à elle seule, servir à déterminer ces petits cristaux, comme appartenant à l'une ou à l'autre de ces deux espèces zéolithiques.

Quoique les cristaux maclés ne soient pas rares, il est cependant plus fréquent de les observer formant des groupes irréguliers; la figure 4 nous montre ces cristaux enchevêtrés, tels qu'ils apparaissent lorsqu'on les isole de la vase par décantation. Ces microlithes groupés proviennent de la Station du 16 septembre 1875, n° 276, lat. 13°28' S.; long. 149°30' W.; profondeur 2,550 brasses; température du fond 1°C.

Ils sont revêtus d'un enduit de manganèse et de fer qui se concrétionne souvent au centre du groupe. On ne voit dans cette figure qu'une seule macle en croix; les autres groupes de cristaux sont formés tantôt par deux microlithes qui s'entre-croisent sous des angles variables ou qui se juxtaposent, tantôt par trois ou quatre petits cristaux qui se superposent. Mais on observe déjà, dans certains groupes, une tendance à affecter une disposition sphérolithique ou radiée autour d'un centre. Dans d'autres cas, la structure sphérolithique est plus parfaite, comme nous allons le montrer en décrivant des globules zéolithiques formés par des cristaux radiés de phillipsite. Ces globules sont très abondants dans les vases sous-marines que nous étudions.

Rappelons que cette disposition globulaire ou sphérolithique est en quelque sorte le propre de plusieurs espèces appartenant au groupe des zéolithes; il suffit de mentionner les bourrelets zéolithiques cristallins, plus ou moins sphériques, qui tapissent les creux de certaines roches volcaniques altérées. Si, dans ces cas, la structure sphéro-

lithique n'est jamais parfaitement réalisée, c'est que ces cristaux se forment appuyés sur la roche. Dans notre cas, au contraire, la structure globulaire est fréquente : c'est que ces petits groupes de cristaux radiés se sont développés à l'état libre dans la vase.

Les sphérules dont nous allons parler sont de la même nature minérale que les microlithes isolés, maclés ou groupés, dont il vient d'être question; mais leur taille est plus grande; elle permet de les distinguer à l'œil nu ou à la loupe. Lorsqu'on a séparé par décantation ou à l'aide des liqueurs denses, comme le borotungstate de cadmium, les divers éléments de la vase, on observe, parmi les particules les plus volumineuses, des grains ressemblant à ceux d'un sable ferrugineux. On peut voir qu'ils sont souvent sphériques, et, à l'aide d'une bonne loupe, on constate qu'ils sont terminés à la surface par des facettes cristallines légèrement miroitantes. Ils sont toujours souillés par la vase argileuse et enduits de manganèse et de fer. Le diamètre moyen de ces sphérolithes est environ de 0,5 millimètre; il peut atteindre dans quelques cas 1 millimètre (voir fig. 2).

Au microscope, en lumière réfléchie, on constate que les faces qui miroitent à la surface des globules sont celles répondant à deux faces prismatiques *m* d'individus simples simulant un dôme, ou à quatre faces de deux individus maclés suivant la loi que nous avons rappelée, et qui viennent apparaître à la surface du sphérolithe simulant quatre faces de pyramide surmontant un cristal prismatique.

En cimentant ces sphérules à l'aide de baume du Canada, on peut les polir jusqu'à ce qu'ils deviennent suffisamment minces pour les soumettre à l'examen

microscopique en lumière transmise. Cet examen nous montre des détails qui complètent ce que nous venons de dire de la structure de ces sphérules, et qui prouvent qu'on doit les considérer comme étant formées de petits microlithes de phillipsite à structure radiée. La figure 3 représente un sphérule de la Station n° 275, sectionné approximativement par le centre; elle nous permet de voir parfaitement la disposition interne de ces boules zéolithiques. Les cristaux qui les composent s'amincissent vers le centre du globule, s'y terminent en coins, allongés suivant l'arête *c/b*; ils s'avancent plus ou moins régulièrement suivant les rayons, en s'élargissant graduellement à mesure qu'ils s'approchent de la périphérie. Cependant cette structure n'est pas tout à fait celle dite fibro-radiée; chacun des cristaux a son individualité trop bien marquée : c'est, à proprement parler, une structure radiée que nous constatons. Dans la figure, quelques-uns des cristaux sont sectionnés plus ou moins parallèlement à l'axe d'allongement; on voit alors que l'extrémité est terminée par les faces *m/m*. On observe aussi sur ces microlithes des zones de croissance indiquées par des inclusions de la vase limoniteuse ou manganésifère; souvent ces zones ne présentent pas de direction bien nette; mais, dans certains cas, les inclusions sont orientées et offrent une disposition en chevron, qui paraît répondre à l'orientation des lamelles hémitropes qu'on observe sur la face *b* des cristaux maclés de phillipsite. Il est très difficile, même sur les cristaux assez grands des sphérolithes, de juger de leurs propriétés optiques; cette difficulté augmente surtout en raison de la forme en coin qu'affecte chacun des individus. On sait d'ailleurs que, dans les sphérolithes, les propriétés optiques des cristaux individuels, de même que les macles, perdent toute régularité.

La figure 4 nous montre un de ces sphérules taillés plus près de la surface; la section entame les cristaux radiés vers leur extrémité extérieure. Suivant qu'ils sont taillés plus ou moins normalement à l'arête *c/b*, la forme des sections est tantôt un parallélogramme plus ou moins allongé, ou elle se rapproche d'un carré; ce sont les formes que doivent donner, en effet, ces cristaux de phillipsite. Quelquefois on observe aussi des sections à angles rentrants: ce sont alors des traces de macles cruciformes. C'est le cas en particulier pour deux ou trois sections vers le haut de la figure, à droite.

Nous venons d'envisager les caractères physiques de ces cristaux, et tout nous porte à conclure qu'au point de vue de la forme, on peut les rattacher à l'espèce minérale à laquelle nous les avons rapportés. Cette détermination est confirmée d'ailleurs par les analyses auxquelles ces substances furent soumises.

Trois analyses des cristaux zéolithiques de la Station n° 275 ont été faites sur des matières choisies, aussi pures qu'on pouvait les obtenir par décantation ou par séparation à l'aide des liqueurs de haute densité, sans recourir à un décapage par les acides. L'analyse que nous publions a été faite par nous; les deux autres sont de M. le docteur L. Sipöcz, chimiste de la ville de Carlsbad, qui a bien voulu se charger de faire ces recherches sur des matériaux identiques à ceux qui ont servi à faire la nôtre. Les analyses de M. Sipöcz concordent avec celle dont les résultats suivent; elles paraîtront dans le mémoire où seront développés les faits que nous indiquons dans cette notice préliminaire. Les cristaux zéolithiques analysés proviennent du sondage n° 275, 16 septembre 1875, profondeur 2350 brasses.

I. 0^{gr},7228 de substance soumise pendant quinze heures à une température de 125°C. perdit 0^{gr},0375 d'eau; la perte au feu fut de 0^{gr},0685. En fusionnant par les carbonates de soude et de potasse, on obtint 0^{gr},5520 de silice, 0^{gr},0446 de peroxyde de fer, 0^{gr},1271 d'alumine, 0^{gr},0125 de chaux, 0^{gr},0208 de phosphate de magnésie ré pondant à 0^{gr},0074 de magnésie.

II. 0^{gr},7548 de substance traitée par l'acide fluorhydrique et l'acide sulfurique donna 0^{gr},1112 de chlorures de potassium et de sodium, 0^{gr},1879 de chloroplatinate de potasse, ré pondant à 0^{gr},0565 de potasse; par différence on a 0^{gr},0285 de soude.

SiO ₂	48,70
Fe ₂ O ₃	6,47
Al ₂ O ₃	17,58
MnO	forte trace
CaO	1,70
MgO	1,02
K ₂ O	4,83
Na ₂ O	3,75
Eau à 125° C. (15 h.).	7,95
Perte au feu	9,47
	<hr/>
	101,47

La présence du fer ainsi que du manganèse, qu'attestent les trois analyses, doit être mise sur le compte de l'enduit qui recouvre ces cristaux, et des inclusions qu'ils renferment. A part ces matières étrangères, la composition exprimée par l'analyse est bien celle qui rend la moyenne de la composition de la phillipsite, sauf la teneur en alumine, qui est un peu faible; mais les écarts peuvent s'interpréter, étant donnée la nécessité où nous nous trouvons de nous servir, pour ces essais, d'une matière peu homogène et dont la finesse du grain rendait impossible un triage parfait, même sous l'objectif du microscope. Ajoutons que, comme les zéolithes, ces cristaux sont attaquables par

(100)

l'acide chlorhydrique et qu'ils laissent après ce traitement un squelette de silice.

Nous pouvons donc conclure de tout ce qui précède que ces cristaux doivent être rapportés à l'espèce phillipsite. Dans une communication suivante, nous montrerons les conditions bathymétriques et les associations minéralogiques de ces cristaux de zéolithes; nous indiquerons quelle doit être l'interprétation à donner pour expliquer leur formation, dans les vases sous-marines. Cette espèce minérale, qui n'était connue jusqu'ici que dans de rares gisements, devient, après les recherches dont cette notice fait l'objet, l'une des espèces cristallisées les plus répandues de la nature, et celle qui, dans les formations de nos océans, joue le rôle le plus considérable, tant au point de vue du nombre des individus cristallisés que de la surface qu'occupe leur dépôt.

EXPLICATION DE LA PLANCHE.

Tous les cristaux et les sphérolithes figurés sur cette planche proviennent de la Station n° 276 (voir page 95).

FIG. 1. Cristaux de phillipsite isolés et groupés tels qu'ils se montrent lorsqu'on les a séparés, par décantation, de la masse argileuse. Les parties opaques fixées aux groupes de cristaux sont de petites concrétions d'oxyde hydraté de manganèse et de fer (voir page 95) $60/1$ lum. ord.

FIG. 2. Globule sphérolithique formé de cristaux radiés de phillipsite; lumière réfléchie (voir page 96) $45/1$.

FIG. 3. Globule sphérolithique de phillipsite taillé approximativement par le centre et montrant sa structure interne (voir p. 97) $20/1$ lum. ord.

FIG. 4. Globule sphérolithique de phillipsite taillé près de la surface, plus ou moins normalement à l'arête c/b (voir p. 98) $40/1$ lum. ord.

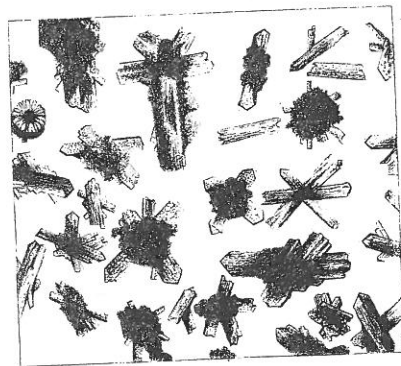


Fig. 1.

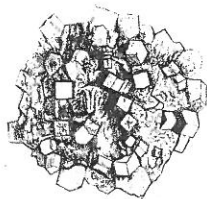


Fig. 2.

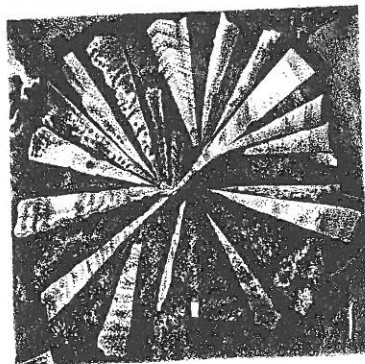


Fig. 3.

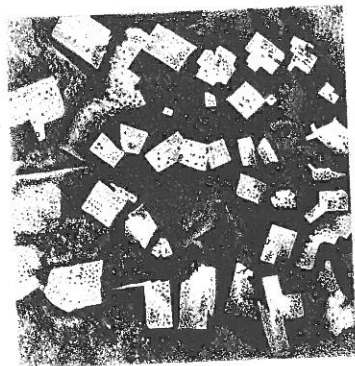


Fig. 4.

Notice sur les cristaux de phillipsite des sédiments du centre de l'océan Pacifique, 2^e partie; par A.-F. Renard, correspondant de l'Académie.

Après avoir indiqué dans la première partie de cette notice les caractères physiques et la composition des cristaux zéolithiques des sédiments du Pacifique, nous avons à montrer les conditions dans lesquelles on découvre la phillipsite et les matières minérales qui l'accompagnent. Nous pourrions ainsi aborder les questions qui se rattachent au mode de formation de ces cristaux.

Comme nous l'avons dit, c'est dans la région du Pacifique comprise entre les îles Sandwich et les îles Basses que s'étalent les sédiments zéolithiques. Résumons en quelques lignes les conditions bathymétriques du lit de la mer pour chacun des sondages du « Challenger » entre ces deux groupes d'îles. Depuis Hawaï jusqu'au septième parallèle nord, les profondeurs atteignent 2,650 à 3,000 brasses; les deux premiers sondages indiquent des boues volcaniques; le troisième sondage, à 3,000 brasses comme le précédent, ramène l'argile rouge; les quatre sondages suivants indiquent la vase à radiolaires et les restes de ces organismes, ainsi que les frustules de diatomées, deviennent plus nombreux à mesure qu'on s'éloigne d'Hawaï. Trois autres sondages, entre le sixième parallèle nord et le premier parallèle sud, ramènent la vase à globigérines; enfin les trois sondages suivants, entre 3° et 8° lat. S., à des profondeurs de 2,550 à 2,750 brasses, indiquent des sédiments où l'on constate beaucoup de

diatomées et de radiolaires. Le sédiment recueilli par 11°20' S, 150°30' W. (Greenw.), à 2,610 brasses, est une argile rouge de couleur foncée. Aux deux stations suivantes, on trouva cette même argile à des profondeurs de 2,350 et 2,325 brasses. Le fond se relève aux approches de Tahiti et, à la dernière station avant d'arriver à cette île, la sonde ramène de 1,523 brasses, une boue volcanique.

Les produits des sondages que nous venons d'énumérer sont tous caractérisés par la présence de microlithes de phillipsite. On retrouve encore, à vrai dire, ces petits cristaux dans les sédiments recueillis entre Tahiti et Valparaiso; mais ils y sont plus rares et ils disparaissent avant qu'on ait atteint les côtes de l'Amérique du Sud. On peut dire que le centre de la région à zéolithes est situé entre Hawaï et Tahiti: c'est là que ces minéraux sont incontestablement le plus abondants. Nous observons, en outre, qu'ils sont surtout répandus dans l'argile rouge et, ce qui n'est pas moins important au point de vue de leur origine, qu'ils sont constamment associés dans tous ces sédiments à des espèces minérales volcaniques, à l'état de fragments minuscules. On constate, en effet, dans ces dépôts, des feldspaths à base de potasse et de soude, de la magnétite, de l'augite, de la hornblende, du péridot, du mica noir; parmi les éclats de roches les plus fréquents sont des lapilli de basalte, d'andésite, de limburgite, de tachylite, de palagonite, de ponce verdâtre; en un mot, presque toutes les roches basiques de la série éruptive récente. Disons encore que les fragments des minéraux et des roches qu'on vient d'énumérer sont tous plus ou moins profondément altérés.

C'est donc dans une région du lit de l'océan où abondent

des produits volcaniques de la série basique, que se sont développés les cristaux de phillipsite. Peut-être sur aucun point du globe ne retrouve-t-on ces fragments de roches éruptives répandus aussi nombreux et couvrant d'aussi grandes surfaces. L'étude des sédiments de chacune des stations du « Challenger », depuis les îles Sandwich jusqu'au sud de l'archipel des îles Basses, permet de constater leur présence d'une manière constante. Il est important de faire ressortir que ces matières éruptives sous-marines sont sous la forme de lapilli ou de particules microscopiques, telles que nous les connaissons pour les cendres volcaniques. Si la sonde n'a pas démontré que le bassin du Pacifique est revêtu en bien des points par des coulées de lave, c'est que cet appareil, comme la drague, ne peut pénétrer qu'à la surface des sédiments, et que ces couches superficielles sont presque toujours formées de matières vaseuses. Mais, étant donnée l'accumulation de matières volcaniques meubles qu'on y constate, tout porte à faire admettre que, sous les dépôts de vase, le sol doit être constitué, sur des espaces considérables, par de véritables coulées volcaniques. Quoi qu'il en soit de cette manière de voir, il est incontestable qu'en ces points écartés des côtes continentales, situés en dehors de l'action de transport des courants, des vagues, des marées et des fleuves, l'élément le plus répandu dans les sédiments océaniques est de nature volcanique ou qu'il résulte, comme nous allons le montrer, de la décomposition de produits éruptifs.

Demandons-nous d'abord quelles sont les roches sub-aériennes où les zéolithes sont en quelque sorte cantonnées. On peut dire que ces roches sont de même nature

que celles dont nous observons des fragments sur le lit du Pacifique, et que, partout où les zéolithes se montrent, on les trouve dans des conditions analogues à celles où nous les découvrons dans les vases sous-marines. S'il est un fait bien établi, c'est que, dans l'immense majorité des cas, les zéolithes ne se rencontrent jamais dans des roches fraîches ou inaltérées; jamais non plus on ne les observe comme produits directs d'une cristallisation par voie ignée, ni comme produits de sublimation. C'est dans les creux, les boursouffures, les fentes de certaines masses éruptives anciennes ou récentes et dans leurs tufs, qu'ils se sont particulièrement développés comme minéraux secondaires. Quelquefois aussi on les y voit se substituer par pseudomorphose à des silicates anhydres. Un lien intime unit ces zéolithes aux matières sur lesquelles elles sont implantées, ou auxquelles elles sont associées : ces silicates hydratés ne sont autre chose que des minéraux volcaniques transformés sous l'action de l'eau et en quelque sorte régénérés. Dès que ces roches cristallines ou leurs tufs sont exposés aux eaux qui les pénètrent, on voit les pores se garnir de minéraux zéolithiques. Ce remplissage est en rapport direct avec le degré d'altération des masses éruptives. En somme, ces veines, ces filonnets, ces géodes, ont été tapissés de minéraux zéolithiques par une exsudation, si l'on peut s'exprimer ainsi, de la roche qui les renferme. C'est surtout dans les géodes des basaltes, des phonolithes, des diabases, ou dans les tufs respectifs de ces masses éruptives, qu'on les constate. Or, les matières volcaniques sous-marines de la région que nous envisageons, sont précisément celles qu'on pourrait considérer comme des tufs de roches basaltiques.

L'étude des cristaux ou des enduits zéolithiques qui

garnissent les produits éruptifs subaériens, indiquent nettement que ces minéraux secondaires ont été formés par les eaux; celles-ci ont emprunté à la roche même qui sert de gangue les éléments constitutifs des zéolithes. On peut souvent suivre, aux diverses zones des géodes, la série graduelle des altérations que les roches ont subies sous l'influence de l'eau qui s'y infiltre, en déposant dans les creux les matières dont elle s'était chargée durant son passage à travers les canaux capillaires des masses éruptives.

Les roches amygdaloïdes de la série basique de tous les âges permettent d'observer les faits que nous rappelons; on a même constaté des zéolithes dans des laves aussi récentes que celles du Puy-de-Dôme et de Gravenoire. En un mot, partout où apparaissent les roches volcaniques basiques, on est sûr de voir apparaître aussi les minéraux du groupe de zéolithes, toujours formés par l'action des eaux agissant sur les masses volcaniques où ces minéraux sont implantés: c'est le cas en Auvergne, en Bohême, au Siebengebirge, en Islande, au Dekkan, aux roches des environs d'Idar, aux masses éruptives du trias d'Écosse, etc.

Dans certaines circonstances exceptionnelles seulement on voit les zéolithes passer dans les couches stratifiées: les solutions qui les déposèrent peuvent alors en avoir puisé les éléments aux roches éruptives avoisinantes, ou bien ces couches sédimentaires auront été, à l'origine, des matières tuffacées plus ou moins semblables à celles que nous voyons se déposer sur le fond du Pacifique. C'est très probablement dans ces conditions qu'on trouve des zéolithes dans des schistes argileux à Andreasberg et à Eule, dans des calcaires à Chappel, Fifeshire, où l'on constate l'apophyllite avec opale remplissant des stro-

phonèmes, dans les grès du tertiaire supérieur à Crevaucoure, dans les filons du Lac Supérieur, où les zéolithes sont associés aux minerais de cuivre.

Mais dans tous les gisements où l'on constate leur présence, et quelle que soit la nature de la roche qui leur sert de gangue, toujours ces silicates se présentent avec les caractères d'origine hydatogène. On peut avancer aussi comme résultat certain d'un nombre considérable d'observations que les masses minérales, où elles sont comme cantonnées, appartiennent surtout aux roches amygdaloïdes de la série basique.

Un autre fait, qui nous paraît bien significatif, doit être relevé: c'est qu'autant nous voyons les zéolithes abonder dans les roches volcaniques basiques, autant d'autres roches cristallines ne se prêtent que peu ou point au développement de ces minéraux. C'est ainsi que les pâtes des granites et des porphyres, plus riches en acide silicique que les roches mentionnées tout à l'heure, ne renferment pas de zéolithes; ces minéraux y sont remplacés par des concrétions siliceuses: par du quartz, de la calcédoine, de l'opale. Tout ceci démontre d'une manière évidente que les eaux infiltrées dans les masses cristallines n'y déposent d'autres matières que celles qu'elles ont puisé dans ces mêmes roches; que ce sont les produits d'altération de ces roches qui fournissent les éléments constitutifs des zéolithes ou des concrétions siliceuses.

L'eau n'est donc que l'instrument de cette régénération de minéraux. Au moment où elle s'infiltré, elle peut n'être chargée d'aucun des éléments qui constituent les produits secondaires qu'elle va déposer: ceux-ci se trouvent en réserve dans les masses éruptives d'où l'eau les

enlève pour les abandonner bientôt à l'état de cristaux ou d'enduits amorphes.

L'étude des phénomènes contemporains vient à son tour appuyer les déductions précédentes tirées de l'observation des roches éruptives des périodes géologiques.

Par des recherches qui font date dans la science, Daubrée a établi qu'à Plombières, une eau à peine minéralisée, s'infiltrant dans le béton et dans la maçonnerie à l'aide desquels les Romains avaient capté la source, détermine la formation de zéolithes, parmi lesquels ce savant a constaté la phillipsite cristallisée. Dans les boursoffures des briques et dans le ciment se développent, sous l'influence des eaux qui les pénètrent, des minéraux en tous points identiques à ceux dont nous constatons la présence dans les roches vésiculaires de la série basique. A Plombières, mieux que partout ailleurs, on peut déterminer les conditions qui président à la formation des zéolithes. On y trouve, en particulier, la démonstration certaine que les eaux qui les déposent en prennent les éléments au milieu ambiant.

Les eaux de Plombières, en effet, sont à peine minéralisées, et, d'autre part, on ne trouve pas de traces de zéolithes ni d'autres minéraux contemporains dans le gravier sableux qu'elles traversent avant d'arriver au béton ou à la maçonnerie; en outre, ces formations sont absentes aussi dans le granite tout à fait friable qui s'est trouvé, à Plombières, soumis à des conditions identiques à celles où se trouvaient le ciment et les briques romaines. Il faut donc conclure de ces faits, et surtout de cette localisation, que c'est la matière même dans laquelle les cristaux se déposent qui fournit à l'eau les éléments constitutifs des zéolithes. On voit donc ici d'une manière évidente que

c'est suivant la composition ou l'altérabilité des masses minérales que l'eau traverse, que la substance zéolithique est soustraite et mise en état de cristalliser. Le granite et le gravier, plus riches en silice, résistent mieux à cette action dissolvante; les eaux n'y peuvent rien puiser; elles n'y déposent rien. Nous constatons ainsi dans ces phénomènes modernes l'exacte répétition de ceux que l'étude des roches cristallines des terrains géologiques a fait découvrir.

Si nous nous sommes arrêté à faire ressortir quelques détails des observations que Daubrée a conduites avec une si remarquable sagacité à Plombières, et qu'il a trouvées confirmées à plusieurs autres sources thermales, c'est que non seulement ces phénomènes jettent une vive lumière sur ceux du passé du globe, mais parce que nous y trouverons des points de comparaison permettant d'établir, avec une très grande probabilité, l'origine des zéolithes sous-marins.

En tenant compte de l'ensemble des faits que nous fournit l'étude des roches zéolithiques et celle de la formation des zéolithes contemporains, voici comment on peut envisager l'origine des petits cristaux de phillipsite des vases du Pacifique.

Les dragages et les sondages de la région à zéolithes nous y prouvent l'abondance exceptionnelle de fragments ou de lapilli de basalte vésiculaire, souvent avec base vitreuse très développée, d'andésite, de tachylite, de ponce verdâtre riche en fer; toutes ces roches appartiennent à la série basique, et parmi elles se trouvent les types de la série éruptive les plus pauvres en silice.

A ces lapilli, que nous constatons toujours à un état

d'hydratation et de désagrégation plus ou moins avancé, sont associés, avec une remarquable constance, des fragments de palagonite représentant une des dernières phases de l'hydratation des verres volcaniques basiques. Nous constatons, en outre, dans la vase des particules microscopiques, qui doivent avoir été projetées comme cendres volcaniques lors des éruptions subaériennes ou sous-marines.

Ces cendres proviennent, suivant toute vraisemblance, des éruptions qui ont semé sur le lit de la mer les lapilli basiques éminemment altérables. Ces particules sont donc aussi de nature basique, et leur état de division extrême doit favoriser d'une manière exceptionnelle leur attaque par les eaux.

Non seulement les roches qui viennent d'être énumérées sont celles où, dans les terrains géologiques, les zéolithes se sont développés avec une prédilection marquée, mais elles sont surtout représentées par leurs variétés vitreuses. Or, on sait par les observations sur le terrain et par les expériences de laboratoire, que ces variétés vitreuses sont précisément celles qui offrent le moins de résistance à l'action des eaux, et que celles-ci les transforment facilement, en partie du moins, en matières de nature zéolithique.

Quel doit être le résultat de l'action de l'eau sur des roches et des minéraux de la nature de ceux que nous trouvons sur le lit du Pacifique? Évidemment le même, au fond, que celui observé aux roches analogues dans les affleurements subaériens où nous pouvons suivre les modifications qui s'opèrent.

La suite des phénomènes qui accompagnent l'altération de ces roches, a été retracée, il y a longtemps, par Ebel-

men, et toutes les recherches faites depuis tendent à confirmer celles que ce savant publiait dès 1845. Les minéraux qui constituent les basaltes et les roches basiques, en général, subissent, sous l'influence des eaux qui les attaquent, souvent à la faveur de l'acide carbonique qu'elles renferment, une série de transformations qui se reproduisent avec constance dans la nature et qu'on peut résumer ainsi : durant la décomposition de ces roches, les eaux enlèvent aux silicates alcalins presque tout ce qu'ils renferment de potasse ou de soude, et, en même temps, la silice est libérée. Pour les silicates à base de chaux et de magnésie, de fer et de manganèse, la presque totalité de la chaux et du fer se sépare avec une quantité très notable de silice. Les eaux enlèvent ces divers éléments, qui tendent à disparaître de la masse primitive; le fer et le manganèse restent dans le résidu de cette décomposition à un état supérieur d'oxydation. Quant à l'alumine qui entre dans la composition des silicates, une fraction en est éliminée; mais la majeure partie se concentre dans le résidu, en retenant une certaine portion de silice et en fixant une certaine quantité d'eau. Le produit final de ce résidu se rapproche de plus en plus d'un silicate d'alumine hydraté, qui constitue une masse argileuse renfermant toujours des traces d'alcalis, surtout de potasse, et chargée de fer et de manganèse. Les eaux entraînent les éléments qu'elles ont ainsi enlevés aux roches, et peuvent les déposer aux abords immédiats des points où elles les ont extraits, ou bien ces substances sont emportées plus loin, suivant que le liquide est lui-même plus ou moins rapidement entraîné.

Nous allons montrer que ces phénomènes se réalisent d'une manière analogue sur le fond du Pacifique; les différences qu'ils peuvent présenter ne sont pas essentielles

et s'expliquent quand on tient compte des conditions spéciales du gisement.

Étant donnée la nature des roches dont nous constatons la présence sur le lit de la mer, dans la région que nous envisageons, la formation des zéolithes doit s'y produire comme on vient de l'indiquer; mais ces minéraux s'y présenteront avec un caractère propre au milieu où ils se développent: ils seront en individus cristallographiquement définis ou en agrégats, mais toujours à l'état libre, non implantés. Les eaux marines, agissant sur ces matières volcaniques basiques, se chargent des éléments qu'elles vont déposer comme zéolithes; le résidu se transforme en masse argileuse, au sein de laquelle le manganèse et le fer se concrétionnent en nodules de peroxyde hydraté. C'est dans cette bouillie argileuse que les cristaux zéolithiques doivent se déposer; étant donné le mouvement à peine sensible des eaux, les solutions ne peuvent être entraînées bien loin, comme c'est quelquefois le cas dans les matières qui proviennent de la décomposition subaérienne des basaltes. Ces cristaux ne peuvent s'implanter sur cette vase sous-marine comme ils le font sur les parois solides des roches cristallines: de là le caractère spécial qu'ils affectent d'être terminés sur tout leur pourtour par des faces cristallines, ou de former des agrégats ou globules sphérolithiques dont la surface est hérissée de facettes. Ce sont bien là les traits propres de cristaux formés dans des matières vaseuses et qu'on a reconnus depuis longtemps aux hyacinthes de Compostelle, à des cristaux de gypse, aux groupes radiés de sulfure de fer qui ont cristallisé dans des conditions de milieu analogues à celles où nous trouvons nos cristaux microscopiques de phillipsite.

Ainsi la présence des matières éruptives dont la décomposition, sous l'action de l'eau, donne naissance aux zéolithes, la coexistence de ceux-ci avec le résidu normal de l'altération des roches basiques, l'argile et les concrétions fero-manganésifères, les caractères spéciaux de ces microlithes de phillipsite; en un mot, l'ensemble des faits que nous constatons sur le lit du Pacifique, vient appuyer d'une manière bien significative l'interprétation que nous proposons. Elle nous paraît donner une explication adéquate de l'origine des cristaux de phillipsite.

Cependant quelques points, sur lesquels nous n'avons pas insisté, pourraient être soulevés contre cette manière de voir. Nous allons examiner ces doutes, qui se présentent assez naturellement d'ailleurs. On peut se demander tout d'abord si les substances que l'eau de mer extrait des silicates des roches volcaniques, ne doivent pas se répandre par diffusion dans la masse océanique et se perdre en quelque sorte dans cet immense réservoir. Pour lever ce doute, il suffit de tenir compte, nous paraît-il, d'un fait que les recherches océanographiques récentes semblent avoir établi: c'est qu'aux grandes profondeurs les eaux ne subissent plus d'une manière sensible l'influence des mouvements superficiels, les courants, les vagues et les marées. On admet que les couches liquides du fond n'éprouvent qu'un mouvement en masse d'une très grande lenteur et qui contraste avec l'agitation des eaux de la surface. Or, nous avons dit que, pour la formation des zéolithes, il suffit d'une eau qui se renouvelle avec une grande lenteur; nous avons donc au fond du Pacifique cette condition qu'on observe pour les eaux qui s'infiltrent dans les roches subaériennes et y déposent ces silicates hydratés. Grâce à la quasi-immobilité de l'eau en contact avec les

débris volcaniques et qui imbibe la bouillie sédimentaire, la diffusion, pour n'être pas suspendue, ne doit s'opérer dans les couches profondes de la mer qu'avec une lenteur telle qu'elle permettra aux éléments dissous de se déposer, au moins en partie, aux points où ils sont extraits. L'une des conditions exigées pour la formation des zéolithes, le renouvellement lent des eaux, est donc réalisée au fond des mers.

Une autre objection tirée de la basse température des eaux aux grandes profondeurs pourrait être soulevée. En tenant compte de la température des couches inférieures de l'océan, qui oscille entre 2° ou 3° au-dessus ou au-dessous de zéro, on pourrait penser que ces conditions thermiques sont incompatibles avec la cristallisation de ces zéolithes. On a admis généralement que ces minéraux réclamaient, pour leur formation, des eaux de température élevée; mais qu'ils puissent se produire sans exiger une grande chaleur, c'est ce que nous prouvent les zéolithes de Plombières et d'ailleurs; nous avons vu qu'ils s'y développent jusqu'à fleur de terre sous l'action d'eaux, thermales à vrai dire, mais dont la température s'élève à peine au-dessus de 40°. On est loin, dans ce cas, des hautes températures que l'on avait hypothétiquement invoquées pour expliquer le dépôt de toutes les matières zéolithiques.

A en juger par les effets qui se sont produits à Plombières avec des eaux si peu chaudes, durant l'espace relativement court qui nous sépare de la période romaine, on peut comprendre comment, à des températures même notablement plus basses, des phénomènes analogues peuvent se produire si l'on fait entrer en ligne de compte, comme nous sommes d'ailleurs en droit de le faire, la grande

altérabilité des silicates basiques et l'état de division extrême où nous les trouvons sur le fond du Pacifique.

Ce que des eaux à peine échauffées, comme celles des sources, peuvent réaliser, les eaux marines le réaliseront aussi dans une certaine mesure, surtout si l'on doit accorder au temps d'agir comme facteur dans ces réactions qui ne se traduisent, du reste, que par la formation de cristaux minuscules dont la taille excède à peine quelques fractions de millimètre.

Ajoutons qu'il serait facile de prouver que, dans la décomposition d'un grand nombre de roches et le dépôt des zéolithes sous l'influence de l'eau, celle-ci n'a pu agir qu'à une température relativement peu élevée. On conçoit facilement que si une eau à peine minéralisée, comme celle de Plombières, suffit pour attaquer des substances comme la brique et le béton et pour y provoquer la formation des zéolithes et d'autres espèces, la calcédoine, l'opale, etc., l'eau de mer peut exercer une action analogue sur les silicates naturels qu'elle baigne. Si l'on doit admettre que l'eau météorique suffit à décomposer les roches, tout nous indique que l'eau de mer chargée de ses sels doit attaquer les matières minérales qu'elle pénètre. On sait que l'eau, en contact avec des silicates alcalins finement pulvérisés, ne tarde pas à donner elle-même une réaction alcaline, et que dès lors elle peut agir à la faveur de l'alcali qu'elle renferme. A cette action des eaux peut encore s'ajouter celle, bien plus énergique, quoique plus localisée, des exhalaisons acides, qui forment le cortège habituel des manifestations volcaniques dont les régions sous-marines du Pacifique doivent avoir été bien souvent le théâtre.

Peut-être le rôle considérable que jouent ces zéolithes dans les sédiments océaniques, les grandes étendues recou-

vertes par ces formations, pourraient-ils être regardés comme inconciliables avec l'interprétation que nous avons donnée.

Pour lever ce doute, rappelons ce que nous montre l'exploration géologique du grand massif du Dekkan, où, sur plus de 500,000 kilomètres carrés, s'étalent des couches horizontales de roches basaltiques, dont la puissance totale peut atteindre 500 mètres. Ces nappes de lave et ces tufs, traversés par le chemin de fer de Bombay à Nagpour sur plus de 800 kilomètres, se montrent partout pétris de cristaux de zéolithes d'une dimension incomparablement supérieure à tout ce qu'on connaît. Non seulement ces minéraux associés à des produits de la famille des quartz s'y montrent dans les géodes, mais les roches sont comme traversées dans tous les sens par des tubulures longues, cylindriques, verticales et remplies de zéolithes (1). Je pourrais encore rappeler les zéolithes des massifs du Groenland, du Lac Supérieur; mais ce que je viens de dire suffit à montrer quelles vastes proportions peut prendre à la surface du globe la formation de ces minéraux.

En résumé, nous aurions donc dans les sédiments du Pacifique une répétition, sur une plus grande échelle, des phénomènes que nous montrent les massifs volcaniques subaériens; nous y constaterions les mêmes effets de décomposition, qui se traduisent par la transformation d'un silicate basique d'origine ignée en un silicate cristallisé acide d'alumine, de chaux et d'alcali, et en un résidu plus basique et insoluble, riche en oxyde de fer et de manganèse, qui forme l'*argile rouge* et les nodules ferromangésifères.

(1) DAUBRÉ, *Les eaux souterraines aux époques anciennes*, p. 16. Paris, 1887.

Détermination des variations que le coefficient de diffusion éprouve avec la température pour des liquides différents de l'eau; par P. De Heen, membre de l'Académie.

Nous avons étudié, dans un travail antérieur, les variations que le coefficient de diffusion éprouve avec la température lorsque l'on opère sur des solutions aqueuses (*).

Ces recherches nous ont permis d'établir, à titre de *loi-limite*, que la variation du coefficient de diffusion avec la température ne dépend pas de la nature du sel dissous, mais dépend uniquement de la nature du liquide. Cette loi ne doit évidemment être considérée que comme une loi-limite susceptible de subir des écarts plus ou moins sensibles, lorsque la constitution de la solution saline varie d'une manière plus ou moins appréciable par suite de l'accroissement de température. Les écarts dus à cette dissociation physique seront évidemment d'autant plus considérables que l'on opérera à une température plus élevée. De plus, cette loi implique l'emploi de solutions infiniment diluées, condition dont on peut s'approcher sans pouvoir la réaliser complètement.

On doit à M. Voigtlander (**) un travail remarquable sur le sujet qui nous occupe et qui vérifie pleinement la loi que nous avons formulée. Ce physicien a déterminé le

(*) *Bull. de l'Acad. roy. de Belgique*, 5^e série, t. VIII, 1884.

(**) *Zeitschrift für Physikalische Chemie*, p. 516, 1889.