

LES CARACTÈRES MICROSCOPIQUES
DES
CENDRES VOLCANIQUES ET DES POUSSIÈRES COSMIQUES
ET
LEUR ROLE DANS LES SÉDIMENTS DE MER PROFONDE
PAR
JOHN MURRAY,
Directeur de la Commission du *Challenger*,
ET
A. F. RENARD,
Conservateur au Musée royal d'histoire naturelle de Belgique.

Durant la session de 1876, M. John Murray communiqua à la Société royale d'Édimbourg une notice sur la répartition des produits volcaniques incohérents dans les dépôts de mer profonde ; il fit connaître en même temps la présence de poussières cosmiques dans les sédiments recueillis au fond des grandes mers par l'expédition du *Challenger*. Dans ce travail il montrait qu'aux points éloignés des terres, où ni l'action des vagues et des rivières, ni celle des courants ne peuvent amener les débris arrachés aux continents, les produits volcaniques jouent le rôle le plus important parmi les éléments minéralogiques qui se déposent sur le lit des océans. Il faisait ressortir que les ponces, grâce à leur structure, pouvaient être entraînées loin des côtes et qu'après avoir flotté pendant un certain temps, elles s'accumulaient sur le fond de la mer et s'y décomposaient. Les produits volcaniques incohérents projetés du cratère sous la forme de lapilli, de sables et de cendres, transportés par les courants aériens à des distances considérables, vont s'ajouter à leur tour aux ponces qui s'étalent sur les bassins océaniques. On doit

admettre aussi que des éruptions volcaniques sous-marines peuvent contribuer à cette accumulation de silicates et de minéraux pyrogènes, dont nous allons décrire les caractères microscopiques et indiquer la distribution géographique sur l'aire des grands océans.

Nous avons eu l'occasion, durant ces dernières années, de nous livrer à une étude suivie des sujets sur lesquels M. Murray attira le premier l'attention. La notice que nous publions aujourd'hui nous a été suggérée par l'analogie frappante existant entre les produits volcaniques, que nous avons découverts dans tous les sédiments de mer profonde, et les cendres et les minéraux incohérents de la récente éruption du volcan Krakatau. Les phénomènes météorologiques remarquables, dont nous avons été témoins ces mois derniers, ont été attribués à la présence dans l'atmosphère de particules minérales provenant de cette éruption ou de matières pulvérulentes d'origine cosmique. En certaines localités d'Amérique et en Europe, on a recueilli des poussières que l'on considère comme des cendres du Krakatau, entraînées et tenues en suspension par les courants atmosphériques.

L'importance de ces études a été reconnue par la Société Royale de Londres, qui vient de confier à un comité de ses membres le soin de réunir tous les documents et les observations relatives à la distribution des cendres de ce volcan. Dans l'état actuel de la question, nous voyons quelque opportunité à publier le résumé de nos recherches sur les caractères des produits volcaniques incohérents et sur leur présence dans les sédiments pélagiques ; le travail détaillé est destiné aux Rapports sur les dépôts de mers profondes recueillis par le *Challenger* et par les expéditions anglaises et américaines. Peut-être cette notice offrira-t-elle quelques renseignements utiles à ceux qui s'occupent de l'étude des poussières atmosphériques : nous y donnons les caractères microscopiques distinctifs à l'aide desquels nous avons pu établir la nature volcanique ou cosmique de certaines particules minérales, trouvées dans les vases organiques et les dépôts argileux en voie de formation dans les grands fonds.

On ne pourrait, croyons-nous, donner de meilleur exemple pour appuyer nos déterminations que l'étude microscopique des cendres du Krakatau, dont l'un de nous a le premier indiqué la composition minéralogique et chimique (1), et dont les observa-

(1) A. RENARD, *Les cendres volcaniques de l'éruption du Krakatau* (BULL. ACAD. ROY. DE BELGIQUE, 3^e série, t. VI, n° 11, séance du 3 nov. 1883).

tions ont été confirmées par les recherches postérieures d'autres minéralogistes. En outre, les conditions dans lesquelles on a observé les pences flottantes après cette éruption concordent parfaitement avec l'explication donnée, il y a huit ans, par M. Murray, du mode de transport de ces matières vitreuses et de l'accumulation de leurs débris triturés sur le lit de l'océan. Nous montrerons aussi que le triage des cendres volcaniques, qui se fait durant leur transport, a des analogies avec ce que nous observons dans la sédimentation de ces matières sur le lit de la mer.

Dans la première partie de ce travail, nous donnerons la description minéralogique des cendres du Krakatau et quelques observations générales relatives aux produits volcaniques meubles. Nous montrerons les caractères diagnostiques de cette poussière volcanique et des particules de même origine que nous trouvons dans les dépôts pélagiques. La seconde partie sera consacrée aux poussières cosmiques observées dans les sédiments des grandes dépressions marines.

PREMIÈRE PARTIE.

Il n'est pas nécessaire d'insister ici sur l'abondance des pences flottantes, sur l'altération plus ou moins avancée que présentent ces fragments de roches recueillis en haute mer, ni sur leur mode de transport par les vagues et les courants, ni sur leur universalité dans les dépôts marins. Ces points ont été traités avec quelque détail dans la notice de M. Murray, à laquelle nous avons fait allusion tout à l'heure. Nous nous bornerons à résumer brièvement les caractères de ces produits volcaniques, tels que nous les montre l'examen d'un grand nombre de sondages et de dragages exécutés par les expéditions anglaises et américaines. Nous n'avons pas à décrire maintenant les caractères spéciaux des *lapilli* ramenés des grandes profondeurs; ces fragments de roches, plus ou moins scorriacés, appartiennent aux mêmes variétés lithologiques que les laves et les tuffs qui affleurent sur les continents. On y distingue des fragments de roches trachytiques, basaltiques et surtout d'an-désite augitique; les plus remarquables sont incontestablement des lapillis de sidéromélane, souvent entièrement transformés en palagonite, qui passe elle-même aux matières argileuses que nous trouvons réparties dans les grandes dépressions marines.

Notre but n'est pas non plus d'étudier ici la distribution géographique des matières projetées par le Krakatau; nous nous occupons en ce moment à réunir les faits relatifs à cette question, pour les reporter ensuite sur des cartes où seront retracés par M. Buchan les courants supérieurs de l'atmosphère.

Avant de passer à la description des cendres, nous devons attirer l'attention sur quelques points traités dans le travail de M. Murray. On y a fait remarquer que des fragments de ponce *arrondis* flottent loin des côtes, et que, dans certaines régions où les sédiments s'accumulent lentement, le lit de la mer est recouvert d'un dépôt composé essentiellement d'esquilles vitreuses provenant de la Trituration des roches ponceuses. Les phénomènes signalés lors de l'éruption du Krakatau permettent de nous rendre parfaitement compte de la manière dont s'opèrent dans la mer l'usure et

la trituration de ces fragments. Les échantillons de ponce de cette éruption, qu'on a recueillis flottants, sont arrondis comme ceux péchés en pleine mer : les angles de la surface sont usés comme ceux des cailloux roulés. Les seules aspérités qu'on observe sont dues à des cristaux ou à des fragments de cristaux qui se montrent en relief dans la masse vitreuse, celle-ci, grâce à sa structure, présentant moins de résistance à l'usure que les minéraux qu'elle empâte.

Qu'il suffise de rappeler que la baie de Lampoung, dans le détroit de la Sonde, fut bloquée par la vaste accumulation de ponce projetée en quelques heures par l'éruption du Krakatau. Cette barre flottante de ponce avait une longueur d'environ 30 kilomètres sur 1 kilomètre de largeur et 3 ou 4 mètres d'épaisseur ; elle s'élevait de 1 mètre au-dessus de la surface et plongeait de 2 mètres sous l'eau. Ces chiffres indiquent qu'à ce point 150,000,000 de mètres cubes de matières volcaniques s'étaient accumulés. Cette muraille élastique et mouvante se balançait au flux et au reflux des lames, et les fragments qui la formaient étaient entraînés par les courants à des milliers de milles de l'éruption et répartis ensuite sur la surface de l'océan (1).

Ces faits nous expliquent la forme arrondie des ponces recueillies partout au filet dans les eaux superficielles et de celles qui sont descendues sur le lit de la mer lorsque l'eau avait envahi leurs pores. La friabilité de ces roches extrêmement poreuses, l'agitation des vagues qui provoque l'usure de ces blocs pressés les uns contre les autres et nageant à la surface, rendent bien compte de cet aspect de cailloux roulés que nous offrent les pierres ponces péchées ou draguées dans l'océan. On comprend aussi que cette trituration donne naissance à une immense quantité de fragments de ponce pulvérulents, qui viennent s'étaler sur le fond des mers et contribuent, dans une large mesure, à former des sédiments pélagiques. Comme nous l'avons rappelé, la présence de fragments arrondis de ponce a été constatée à la surface de tous les océans et, durant ces dernières années, un grand nombre d'échantillons de ces mêmes roches, affectant tous cette forme, nous ont été envoyés par des capitaines de navires et des missionnaires qui les avaient recueillis dans des conditions identiques. Rappelons encore que ces produits volcaniques vitreux, si fréquents dans les dépressions loin des côtes, sont souvent très altérés.

(1) *Comptes rendus de l'Acad. des sciences*, 17 nov. 1883, p. 1101.

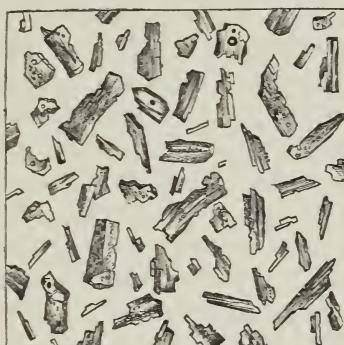
S'il n'est pas difficile de se prononcer sur la nature éruptive de ces échantillons présentant d'ordinaire d'assez grandes dimensions, on ne peut pas être aussi affirmatif dès qu'il s'agit de particules volcaniques sous forme de cendres et qu'on doit recourir au microscope pour trancher la question. Voyons quels sont alors les caractères sur lesquels on doit s'appuyer pour reconnaître la nature volcanique d'un sédiment composé de grains extrêmement fins.

On peut avancer que ce n'est pas tant la présence de minéraux volcaniques que la structure des particules vitreuses microscopiques qui permet de distinguer, dans un dépôt marin comme dans une précipitation atmosphérique, la nature éruptive des poussières. Les minéraux réduits à ces dimensions infinitésimales et irrégulièrement fracturés, comme c'est le cas pour ceux qui constituent les cendres volcaniques, perdent leurs caractères distinctifs. Les proportions microscopiques qu'ils affectent ne permettent pas de juger des propriétés optiques; la forme irrégulière et fragmentaire de ces particules empêche de déterminer les extinctions caractéristiques de l'espèce. Les phénomènes de coloration, le pléochroïsme et la teinte particulière du minéral perdent totalement de leur intensité, qu'ils ne peuvent plus servir à identifier sûrement les fragments de minéraux isolés comme ceux des cendres volcaniques. Il résulte des observations que nous avons eu l'occasion de faire qu'en général un minéral, ayant les caractères de ceux qui constituent ces cendres, ne peut plus être déterminé avec certitude lorsque ses dimensions descendent sous $0^{mm},05$; par conséquent, il n'est guère possible, dans ce cas, d'établir son origine; tandis que les fragments vitreux, provenant des cendres volcaniques ou de la trituration des pences, sont encore susceptibles d'une détermination certaine, même lorsque leurs dimensions sont inférieures à $0^{mm},005$. Une autre raison, montrant que l'absence ou la rareté des cristaux ou de fragments de cristaux volcaniques ne doit pas être considérée comme la preuve qu'une matière sédimentaire, atmosphérique ou marine n'est pas d'origine éruptive, c'est le triage auquel ces substances sont soumises lors de l'éruption.

Le diagnostic le plus certain de la nature volcanique se retrouve toujours, peut-on dire, dans la structure qu'affectent les petites particules vitreuses provenant de la trituration de la ponce ou qui ont été projetées du volcan sous la forme de cendres. La structure spéciale de ces matières se voit dans la fracture; elle laisse son empreinte même sur les plus minimes fragments, où le

microscope ne peut découvrir d'autres propriétés caractéristiques que celles se rapportant à la forme. Pour nous assurer que ces caractères des matières vitreuses volcaniques restent constants jusqu'aux dernières limites où l'on peut pousser la pulvérisation, nous avons broyé, dans un mortier en agate, diverses variétés de ponce. La poudre que nous avons ainsi obtenue était extrêmement fine et néanmoins ces particules infinitésimales présentaient encore les caractères distinctifs des matières vitreuses que nous retrouvons constamment dans les sédiments, et dont les cendres du Krakatau nous donnent une si parfaite illustration. Le caractère diagnostique auquel nous faisons allusion, et qui distingue des laves les cendres et les lapillis, n'est pas la prépondérance extraordinaire de matière vitreuse, mais le nombre prodigieux de bulles gazeuses emprisonnées dans la ponce et dans l'élément vitreux des cendres volcaniques. Ces bulles gazeuses sont dues, on le sait, à l'expansion des gaz dissous dans le magma et qui déterminent l'éruption.

Fig. 1.



Particules vitreuses des cendres du Krakatau tombées à Batavia
le 27 août 1883. $250/1$.

En admettant, comme tout paraît l'indiquer, que ces produits volcaniques incohérents proviennent de la pulvérisation d'un magma fluide, on comprend que ces particules, se refroidissant rapidement, resteront à l'état vitreux, et que, d'un autre côté, les gaz dissous, grâce à l'expansion, formeront des pores nombreux; ceux-ci prendront une disposition allongée par leur mode de projection. L'existence de ces bulles et de cette structure filamenteuse, nous fournit donc le moyen de discerner la nature volcanique de ces matières, en dépit de leur extrême état de division.

C'est de même cette texture bulleuse qui permet à ces corps d'être transportés à d'aussi grandes distances du centre d'éruption.

L'examen des cendres du Krakatau et des poussières qu'on obtient par la pulvérisation des pences de ce volcan montre parfaitement ces particularités de structure. Si l'on soumet au microscope cette matière pulvérulente gris-verdâtre, on la voit composée de grains vitreux ayant environ 0^{mm},1 de diamètre; ils sont presque toujours incolores et criblés d'inclusions gazeuses. Presque jamais ces bulles ne sont sphériques; la forme allongée prédomine, et les fragments prennent ainsi une disposition plus ou moins prismatique. Il arrive ordinairement que plusieurs bulles sont étirées parallèlement les unes aux autres et tellement allongées, que les pores n'apparaissent plus que comme de simples traits; le fragment revêt alors une texture fibreuse qui peut, à première vue, le faire prendre pour un feldspath strié ou pour un reste d'organisme; mais l'examen des contours ne permet jamais de les confondre. En suivant les lignes de contour de ces fragments bulleux, on observe qu'ils ne sont jamais limités par des droites; ils présentent, au contraire, une apparence déchiquetée, toutes les sinuosités étant curvilignes. Ce mode de fracture résulte de la structure bulleuse due aux conditions dans lesquelles se forment les cendres volcaniques; en outre tout semble indiquer que leur nature fragmentaire et leur cassure fraîche résultent des phénomènes de tension, affectant ces matières vitreuses d'une manière analogue à ce que l'on observe pour les larmes bataviques.

Nous avons fait remarquer que les fragments vitreux de teinte foncée sont assez rares dans les cendres du Krakatau; ces granules d'une teinte brunâtre, renferment des squelettes de fer magnétique et sont dévitrifiés par des microlithes (1). Les particules vitreuses dont nous venons de parler sont isotropes; si le champ du microscope s'illumine en certains points, ce phénomène peut être dû à la présence de minéraux, renfermés dans ces esquilles vitreuses; elle peut être provoquée aussi par une tension moléculaire, dont on observe quelquefois les effets au voisinage des bulles.

Ces détails sur la microstructure des particules vitreuses du

(1) De même qu'on peut distinguer macroscopiquement des pences acides ou basiques, on peut aussi reconnaître sous le microscope les produits de Trituration de ces deux séries de roches vitreuses. Les premières donnent des fragments souvent incolores et plus allongés; les secondes montrent des fragments d'une teinte plus foncée et les bulles gazeuses y sont plus arrondies.

Krakatau se retrouvent identiquement les mêmes pour les substances, que nous avons déterminées comme cendres volcaniques dans les sédiments de mer profonde. Leur structure bulleuse, leur mode de projection et leurs dimensions sont extrêmement favorables au transport par les courants aériens. On doit admettre cependant que, dans les sédiments pélagiques, une grande partie de ces esquilles vitreuses n'y sont pas arrivées à l'état de cendres proprement dites; mais qu'elles proviennent de la trituration des ponces flottantes dont nous avons signalé plus haut un si frappant exemple. On comprendra qu'il est à peine possible d'établir une différence entre les cendres volcaniques projetées comme telles du cratère, et les débris pulvérulents qui proviennent de l'usure des ponces nageant à la surface des eaux. De même que nous le constatons pour les produits incohérents du Krakatau, nous trouvons que les cendres volcaniques, distribuées sur le fond des mers, contiennent beaucoup moins de minéraux pyrogènes que d'esquilles vitreuses. Il n'est pas difficile d'interpréter ce fait, lorsqu'on tient compte du mode de formation et des agents de transport des produits volcaniques pulvérulents.

Indiquons maintenant les minéraux que l'on peut déterminer avec certitude dans les cendres de cette grande éruption; ce sont les mêmes que nous avons toujours observés associés aux esquilles vitreuses, dans les sédiments pélagiques. On peut dire d'une manière générale que tous les cristaux sont fracturés, excepté ceux recouverts par la matière vitreuse. Cet enduit est souvent craquelé et bulleux; nous n'avons pas remarqué dans les cendres du Krakatau les globules de verre que l'on a souvent observés attachés aux minéraux des cendres volcaniques, pas plus que nous n'y avons constaté la présence de filaments vitreux rappelant les cheveux de Pélé. Les minéraux des cendres du Krakatau susceptibles d'une détermination rigoureuse sont le plagioclase, l'augite, le pyroxène rhombique et la magnétite (1). Nous allons montrer les particularités qui distinguent chacune de ces espèces.

Parmi ces minéraux, on doit signaler en premier lieu le feldspath

(1) Dans les travaux récents sur les cendres du Krakatau on a signalé comme minéraux accidentels, la pyrite, l'apatite et probablement aussi la biotite. Il est à remarquer cependant que les espèces qui viennent d'être énumérées ne peuvent jouer qu'un rôle bien subordonné en comparaison des particules vitreuses et des minéraux, que nous avons mentionnés.

plagioclase; il y est néanmoins très rare en comparaison des esquilles vitreuses. Ses dimensions sont à peu près les mêmes que celles des particules de verre volcanique et, sauf le cas où ce minéral est entièrement enveloppé d'une couche vitreuse, nous ne l'avons observé que sous la forme de fragments. On peut distinguer quelquefois des cristaux avec la macle de l'albite, et les résultats de l'analyse chimique montrent bien que c'est surtout un feldspath triclinique qui entre dans la composition de ces cendres. Mais les cristaux de feldspath les plus intéressants et les plus caractéristiques, quoique assez rarement représentés, se montrent sous la forme de tables rhombiques d'une extrême minceur, et recouverts d'une fine dentelure de matière vitreuse. Ces cristaux, signalés par Penck (1) dans un grand nombre de lapillis et de cendres volcaniques, et sur la nature desquels des doutes avaient été soulevés, appartiennent incontestablement aux plagioclases; ils représentent un mélange isomorphe analogue à celui de la bytownite. C'est à M. Max Schuster (2) que nous devons cette détermination spécifique. Ayant rencontré dans les sédiments du Pacifique ces cristaux tabulaires rhombiques et possédant quelques bonnes préparations qui pouvaient être utiles à cet habile minéralogiste dans ses remarquables études optiques sur les feldspaths, nous les lui avons soumises. Il en a fait l'examen détaillé, dont on peut résumer comme suit les résultats. Ces observations s'appliquent parfaitement aux cristaux feldspathiques du Krakatau, aussi bien qu'à ceux découverts dans un grand nombre de sondages.

Ces plagioclases sont tabulaires suivant le klinopinakoïde, rarement on observe des individus du type prismatique, allongés suivant l'arête P/M . Ces cristaux tabulaires offrent la combinaison du klinopinakoïde avec P et x , plus rarement avec Pu , y ; quelquefois x et y sont représentés en même temps. Dans le premier cas les cristaux offrent des formes rhombes, dans le second ils sont allongés suivant x ou suivant P . Les dimensions des cristaux varient entre $0^{mm},61$ de largeur et 1 millimètre de longueur maximum et $0^{mm},015$ de largeur et $0^{mm},042$ de longueur minimum. L'extinction du plagioclase est négative. Sa valeur varie entre 22° et 32° sur le klinopinakoïde et entre 8° et 16° sur la base. La valeur moyenne d'un

(1) PENCK, *Studien über lockere vulkanische Auswürflinge* (ZEITSCHRIFT D. DEUTSCHEN GEOL. GESELLSCHAFT, 1878).

(2) SCHUSTER, *Bemerkungen zu E. Mallard's Abhandlung Sur l'isomorphisme des feldspaths tricliniques, etc.* (MIN. PETR. MITTH., 1882, p. 194).

grand nombre de mesures prises sur de bons cristaux est de $24^{\circ} 12'$, $25^{\circ} 6'$ et $20^{\circ} 6'$ sur le klinopinakoïde, $10^{\circ} 42'$ d'un côté et $10^{\circ} 13'$ de l'autre côté de la ligne de macle sur la base. Les individus polysynthétiques, formés par les macles répétées de l'albite, sont très rares. Le feldspath en question est donc, au point de vue optique, à classer entre le labrador et la bytownite. Les combinaisons maclées les plus fréquentes et les plus intéressantes sont, outre les macles de l'albite, celles où on a pu constater les arêtes P/M et P/k comme axes d'hémisphérie, et comme plan de macle les faces P et k .

Ces cristaux et ces fragments de plagioclase contiennent des inclusions de matière vitreuse; ils renferment quelquefois des grains de magnétite. Il se pourrait qu'un petit nombre de granules feldspathiques appartiennent à la sanidine, dont la présence est indiquée par la teneur en potasse ($K_2O = 0,97\%$) que montre l'analyse suivante.

Nous avons dit que les minéraux pyroxéniques de ces cendres sont l'augite et un pyroxène rhombique. Ils apparaissent ordinairement au microscope sous la forme de fragments. On peut obtenir des cristaux terminés de ces espèces en les isolant par un traitement à l'acide fluorhydrique. Les cristaux d'augite montrent les faces du prisme, du brachypinakoïde et laissent entrevoir des faces de pyramide. Ce minéral est pléochroïque, d'une teinte verdâtre avec extinction oblique. C'est ce caractère optique qui permet de le distinguer du pyroxène rhombique auquel il est associé. Ce dernier minéral est transparent, d'une couleur brun foncé fortement dichroïque dans les teintes brune et verte; il est cristallisé sous la forme de prismes rectangulaires terminés par une pyramide et les cristaux éteignent, entre nicols croisés, parallèlement aux arêtes longitudinales. Le fer magnétique, qui paraît assez abondant, se retrouve dans les préparations microscopiques sous la forme de grains opaques irréguliers ou en cristaux octaédriques. Nous n'avons pu déceler ni la hornblende ni l'olivine. Les grains les plus grossiers de ces cendres sont quelquefois de véritables lapillis microscopiques, où l'on découvre dans une base vitreuse des cristaux microlithiques de feldspath, de la magnétite et plus rarement de l'augite. Enfin on observe au microscope des particules d'origine organique que l'on peut reconnaître à leur structure fibreuse ou réticulée; ces impuretés doivent avoir été transportées par les vents ou provenir du sol sur lequel on a recueilli les cendres. Malgré toutes les incertitudes que présente la diagnose exacte de

ces poussières volcaniques, on peut cependant les considérer comme offrant, au point de vue de la composition minéralogique, des analogies avec les andésites augitiques. On sait d'ailleurs que c'est à ces roches que l'on doit rapporter les laves du volcan Krakatau.

Des cendres tombées à Batavia le 27 août 1883, envoyées en Hollande par M. Wolff résidant en cette ville, nous ont donné les résultats suivants à l'analyse :

I. 1,199 gramme de substance séchée à 110° et fusionnée par les carbonates de soude et de potasse donna = 0,7799 gr. de silice, 0,1754 gr. d'alumine, 0,0911 gr. de peroxyde de fer, 0,0401 gr. de chaux et 0,0398 gr. de pyrophosphate de magnésie répondant à 0,01434 gr. de magnésie (1).

II. 1,222 gramme de substance séchée à 110° donna 0,0335 gr. de perte au feu (eau, substances organiques et chlorure de sodium); attaquée par l'acide fluorhydrique et sulfurique, elle donna 0,1161 gr. de chlorures de sodium et de potassium et 0,0613 gr. de chloroplatinat de potassium, ce qui répond à 0,0118 gr. de potasse et à 0,0188 gr. de chlorure de potassium; par différence on a 0,0973 gr. de chlorure de sodium, ce qui répond à 0,05163 gr. de soude.

III. 1,7287 gramme de substance séchée à 110° fut traitée en tube scellé par l'acide fluorhydrique et sulfurique. On employa pour l'oxydation 2,3 c. c. de permanganate de potasse (1 c. c. = 0,0212 gr. FeO), ce qui répond à 0,04876 gr. de protoxyde de fer.

	I.	II.	III.	
SiO ₂	65,04	—	—	65,04
Al ₂ O ₃	14,63	—	—	14,63
Fe ₂ O ₃	4,47	—	—	4,47
FeO	—	—	2,82	2,82
MnO	traces	—	—	traces
MgO	1,20	—	—	1,20
CaO	3,34	—	—	3,34
K ₂ O	—	0,97	—	0,97
Na ₂ O	—	4,23	—	4,23
Perte au feu	—	2,74	—	2,74
				99,44

(1) Une détermination d'acide titanique, faite après la publication de cette analyse, a donné 0,62 %.

On comprend qu'il n'est guère possible de soumettre cette analyse à une discussion. L'abondance des particules vitreuses dans ces cendres rend illusoire le calcul des valeurs obtenues et la répartition des substances entre les diverses espèces minérales constitutives. Cette matière vitreuse peut, en effet, contenir une quantité indéterminée des différentes bases. D'un autre côté, les difficultés de ces calculs sont d'autant plus grandes que les minéraux constitutifs de ces cendres doivent renfermer comme isomorphes les bases que décèle l'analyse. Il n'en reste pas moins vrai cependant que la composition centésimale exprimée par l'analyse appuie les déterminations minéralogiques précédentes, sans permettre toutefois de les préciser; elle se concilie avec l'interprétation que le magma, d'où ces cendres ont pris naissance, répond aux andésites augitiques.

Les fragments vitreux et les minéraux de Krakatau que nous venons de décrire, étant identiques avec ceux que nous découvrons dans les sédiments de mer profonde, nous pouvons conclure que ceux-ci ont une origine analogue à ces cendres volcaniques. Dans certains sondages, la hornblende prédomine sur l'augite, dans d'autres cas, le mica noir est abondant; quelquefois nous découvrons du périclase en cristaux plus ou moins fragmentaires, de la sanidine, plus rarement de l'amphigène et de l'haüyne. On comprendra aisément ces différences, si l'on tient compte de la nature du magma qui a donné naissance aux cendres distribuées dans ces diverses régions de la mer. Dans tous les cas, c'est la prédominance des particules vitreuses, caractérisées par leur structure spéciale, qui nous indique de la manière la plus concluante la nature volcanique des matières minérales d'un sédiment.

Si nous envisageons les conditions qui président à la distribution des cendres dans l'atmosphère ou sur le fond des mers, on se rend compte de cette prédominance des particules vitreuses sur les minéraux volcaniques. On peut dire d'une manière générale qu'on ne doit pas s'attendre à voir les matières éruptives incohérentes présenter une composition absolument identique à celle des masses ignées qui s'épanchent du cratère et à celle des produits meubles, lapillis, bombes volcaniques et scories, projetés à petite distance du foyer. En admettant qu'il existerait, au sortir du cratère, entre les laves et les matières pulvérulentes d'une même éruption, une identité parfaite chimique et minéralogique, et que

les cendres seraient le produit de la trituration de laves figées, on comprend que celles-là, portées au loin par les vents, doivent subir, dans leur trajet au travers de l'atmosphère, un véritable triage d'après le volume et le poids spécifique des éléments amorphes ou cristallins constitutifs. Il en résulte que, suivant les points où elles furent recueillies, des cendres volcaniques peuvent, tout en appartenant à la même éjaculation, présenter des différences qui ne portent pas seulement sur la dimension des grains, mais encore sur les minéraux qui les constituent.

Il est évident que par ce mode de transport, les particules vitreuses seront amenées à des distances plus considérables du centre d'éruption que les minéraux qui leur sont associés. Nous devons noter en outre qu'à la sortie du cratère, elles sont plus abondantes dans les cendres que les minéraux; qu'elles possèdent des particularités de structure qui permettent aux courants aériens de s'emparer d'elles et de les entraîner au loin. Ces esquilles vitreuses formées d'une matière silicatée, où les bases les plus lourdes n'entrent dans la composition que pour une petite partie, sont criblées de bulles gazeuses qui abaissent leur densité, en même temps qu'elles déterminent une fragmentation en particules extrêmement fines. Les minéraux des cendres volcaniques au contraire ne possèdent pas cette structure bulleuse, ils ne sont pas non plus dans cet état de tension des poussières vitreuses brusquement refroidies: ils ne se réduisent donc pas aussi facilement en poudre impalpable et d'une extrême légèreté. Enfin plusieurs de ces espèces minérales volcaniques, grâce aux bases qui jouent le rôle principal dans leur composition, ont un poids spécifique élevé : elles ne seront donc pas entraînées si loin du foyer que les particules vitreuses. Dans tous les cas, celles-ci constitueront la partie essentielle de tout sédiment formé de cendres volcaniques.

Les observations que l'on a réunies jusqu'ici sur la répartition des cendres volcaniques du Krakatau, offrent un nouvel exemple des faits que nous venons d'indiquer. A mesure qu'on s'éloigne du volcan, les cendres recueillies sont de moins en moins riches en minéraux. C'est ainsi que, d'après une communication verbale de M. Judd, les cendres trouvées au Japon après l'éruption d'août 1883 ne contiennent déjà presque plus de pyroxène ni de magnétite.

Si l'on tient compte des remarques qui précédent, on peut indiquer les caractères auxquels on reconnaîtra avec le plus de probabilité si, dans un sédiment atmosphérique recueilli en Europe, des poussières dérivent de l'éruption du Krakatau : il convient

avant tout de rechercher la présence de particules vitreuses; leurs caractères diagnostiques sont si tranchés que tout micrographe peut aisément déceler leur présence. D'un autre côté, les cristaux d'hypersthène, d'augite, ou des granules magnétiques, sans particules vitreuses, ne prouvent pas d'une manière bien certaine que le sédiment appartient aux cendres de ce volcan : on ne comprend pas pourquoi ces minéraux lourds auraient été charriés par les courants alors que les esquilles vitreuses seraient absentes.

On peut en outre déduire, comme corollaire des faits signalés plus haut, que la composition chimique des cendres variera suivant les points où elle furent recueillies et qu'elle tendra même, toutes choses égales d'ailleurs, à devenir plus acide à mesure que l'on s'écarte du centre d'éruption. Si l'on admet, par exemple, que le magma qui a donné naissance aux cendres du Krakatau est celui des andésites augitiques, comme tout semble l'indiquer, la teneur en silice (65 %) de l'analyse précédente paraît trop élevée; mais si l'on tient compte, de ce que les cendres doivent s'appauvrir, durant le trajet, des éléments les plus lourds, qui sont en même temps les plus basiques, on comprend que les matières vitreuses et feldspathiques, qui ont un poids spécifique moins élevé, en même temps qu'elles sont plus acides, iront s'accumuler plus loin du volcan. Il suffit d'attirer l'attention sur ce point pour montrer comment la teneur en silice des cendres volcaniques d'une même éruption peut varier, suivant qu'elles sont recueillies à des distances variables du cratère.

La prédominance des esquilles vitreuses dans les sédiments pélagiques est encore plus prononcée que dans les cendres volcaniques recueillies sur les terres. Cela tient, comme nous l'avons indiqué en commençant, au grand nombre de pences flottantes portées vers la haute mer, et dont les produits de Trituration donnent naissance à une poussière vitreuse qu'il est difficile de distinguer des esquilles projetées des volcans à l'état de cendres impalpables. Disons aussi que la distribution des matières volcaniques incohérentes sur le fond des mers est soumise à un mode de lévigation ayant quelque analogie avec ce que nous constatons pour le triage des cendres transportées par les courants aériens. Lorsque ces cendres viennent à tomber dans les eaux, les particules les plus lourdes, cédant à la pesanteur, atteignent le fond les premières, et viennent former la couche inférieure du dépôt. Les plus légères, plus lentes dans leur chute, s'accumulent sur celles entraînées plus rapidement. Il se forme ainsi une stratification

des éléments d'une même éruption. Nous en avons un très bel exemple dans un fragment de tuff sous-marin du centre du Pacifique, par lat. $22^{\circ} 21'$ S., long. $150^{\circ} 17'$ O. Cet échantillon est entièrement recouvert de manganèse; on y remarque à la base d'assez grands cristaux de hornblende et des particules de magnétite. Cette couche inférieure est surmontée d'une zone où ces minéraux et les grains les plus grossiers passent graduellement vers le haut à un amas stratifié où le feldspath, les débris de ponce vont en se multipliant, en même temps qu'ils diminuent de volume.

Nous n'avons pas à nous occuper ici du mode de formation des cendres volcaniques ni de celles du Krakatau en particulier; il suffira d'indiquer que, dans les poussières du volcan, nous retrouvons certains caractères de nature à faire pencher l'opinion en faveur de l'interprétation consistant à envisager les cendres volcaniques comme formées par la pulvérisation d'une masse fluide par voie ignée, où nageaient des cristaux déjà formés. Dans ce magma les particules vitreuses, pulvérisées et projetées par les gaz, soumises à un refroidissement rapide durant leur transport, se brisent et se transforment en poussière impalpable.

Ce n'est pas seulement l'étude de la composition et l'examen microscopique de ces matières volcaniques qui conduit à cette conclusion; on y est amené aussi quand on envisage la prodigieuse quantité de cendres formée aux diverses éruptions du Krakatau. Il est difficile de concilier ces faits avec l'interprétation tendant à envisager ces cendres comme le résultat de la pulvérisation d'une roche déjà solidifiée dans le cratère. On ne comprend pas, en effet, comment en deux ou trois jours pourrait s'être formée, par ce procédé, l'immense quantité de poussières éjectées par le volcan le 26 août 1883, et dans l'éruption du mois de mai, qui a été le prélude de la catastrophe.

DEUXIÈME PARTIE.

Pour expliquer les lueurs crépusculaires récemment observées, on n'a pas invoqué seulement la présence de particules volcaniques dans l'atmosphère, mais on a suggéré l'idée que ces phénomènes seraient dus à des matières d'origine cosmique disséminées dans les zones supérieures de l'air. Cette interprétation nous amène à ajouter à ce résumé de nos observations sur les cendres volcaniques, celles que nous avons eu l'occasion de faire relativement aux poussières cosmiques, que nous découvrons dans les sédiments des régions abyssales de la mer où les dépôts s'effectuent avec une extrême lenteur.

Dans notre travail sur les sédiments marins, nous avons indiqué l'aire de l'Océan sur laquelle sont distribuées les poussières d'origine extra-terrestre, et nous avons fait connaître les conclusions auxquelles nous conduit leur présence dans les sédiments argileux du centre du Pacifique.

On sait que l'air atmosphérique tient en suspension un nombre immense de corpuscules microscopiques organiques ou inorganiques. Parmi ces particules il en est auxquelles on attribue une origine extra-terrestre. Plusieurs savants, à la tête desquels viennent se placer : Ehrenberg, Daubrée, Nordenskiöld et Tissandier, ont étudié cet intéressant problème et ont présenté des faits à l'appui de la nature cosmique de certaines particules métalliques recueillies dans les précipitations atmosphériques. Mais des objections ont été soulevées contre l'origine extra-terrestre de bien des échantillons de poussières qu'on avait envisagés comme cosmiques.

On a souvent pu démontrer qu'elles étaient constituées des mêmes minéraux que ceux des roches affleurant dans les régions où ces matières pulvérulentes avaient été constatées. Les parcelles de fer métallique que l'on découvrait quelquefois dans les poussières de l'air atmosphérique pouvaient, à vrai dire, être considérées comme extra-terrestres ; mais encore paraissait-il étonnant qu'on ne les trouvât jamais associées aux silicates qui, dans le plus grand nombre de météorites, forment la partie essentielle de ces roches. D'un autre côté, étant donnée la grande analogie de com-

position minéralogique des météorites, il paraissait étrange que les poussières dites cosmiques présentassent, dans les diverses régions où elles étaient recueillies, des caractères si variables au point de vue de la composition. On objectait aussi que le fer natif nickelifère et cobaltifère provenait des roches volcaniques décomposées et qui renfermaient ces substances métalliques : ce doute semblait bien naturel quand on tenait compte, dans notre cas en particulier, des nombreux fragments volcaniques en décomposition répandus sur le fond de la mer. On rappelait, en outre, que des recherches avaient montré que le fer natif se retrouve, quoique rarement, dans diverses roches et diverses couches sédimentaires; enfin on admettait aussi la possibilité d'une réduction de l'oxyde de fer en métal sous l'influence des substances organiques. On faisait encore valoir contre l'origine cosmique de ces particules métalliques, que de fines parcelles de fer natif pouvaient avoir été entraînées par les courants aériens : nos fourneaux, nos machines à vapeur, nos matériaux de combustion, les cendres des foyers et dans notre cas celles des steamers fournissent des quantités considérables de poussière de fer, et rien d'étonnant à ce que ce métal, le plus répandu à la surface du globe, abandonne aux courants aériens des particules qui, transportées par les vents, viennent retomber ensuite sur la terre.

Telles étaient les objections qui se présentaient d'elles-mêmes quand il s'est agi de se prononcer sur l'origine des particules que nous sommes amenés à envisager comme cosmiques. On montrera que plusieurs de ces doutes sont ébranlés par l'examen des conditions dans lesquelles furent trouvées les particules extra-terrestres des sédiments d'eau profonde; et nous verrons que la plus grave des objections que l'on pouvait faire est levée par l'association des globules métalliques avec les corps les plus caractéristiques des météorites pierreuses.

Remarquons d'abord que la distance considérable des terres aux points où nous constatons ces corpuscules cosmiques dans les sédiments, tend à faire éliminer, dans une certaine mesure, les objections que peuvent soulever les particules métalliques trouvées au voisinage des centres habités; d'un autre côté, la forme et les caractères des sphéroïdes que nous considérons comme d'origine extra-terrestre ne sont pas ceux des globules métalliques souvent recueillis sur les terres et sur la nature desquels des doutes avaient été soulevés. Jamais les globules magnétiques, que nous décrivons, ne sont creux ni allongés avec goulot; leur surface n'est pas

craquelée comme celle des globules trouvées aux environs des centres industriels, et avec lesquels nous les avons soigneusement comparés. Jamais non plus nos sphérules magnétiques avec centre métallique ne se rapprochent, ni pour la forme, ni pour la structure, des parcelles de fer natif signalées dans les roches éruptives; en particulier, dans les basaltes du nord d'Irlande, d'Islande, etc.

Après avoir relevé la plupart des objections, voyons les points sur lesquels nous nous appuyons pour admettre l'hypothèse que bon nombre de granules magnétiques trouvés sur le lit de la mer, et spécialement abondants aux points où les sédiments se déposent avec une excessive lenteur, doivent être envisagés comme ayant une origine extra-terrestre. Si l'on promène le barreau aimanté dans certains dépôts pélagiques, par exemple dans l'argile rouge du centre du Pacifique, on extrait des particules magnétiques, dont quelques-unes sont de la magnétite provenant des roches et des cendres volcaniques; elles sont souvent encore attachées à des fragments ou à des enduits vitreux. D'autres grains, également magnétiques, sont parfaitement isolés; ils diffèrent des premiers par des propriétés essentielles. D'ordinaire ils sont parfaitement sphériques et mesurent à peine $0^{mm},2$ de diamètre, généralement leurs dimensions sont beaucoup plus petites; leur surface est tout entière recouverte d'un enduit noir brillant d'oxyde de fer magnétique; souvent on observe à la périphérie des dépressions plus ou moins prononcées. Si l'on vient à briser un de ces sphérules dans un mortier en agate, l'enduit noir brillant se détache assez facilement, et l'on met à découvert un nucleus de métal grisâtre et ductile que l'on peut écraser sous l'effort du pilon. Ce centre métallique, traité sous le microscope par le sulfate acide de cuivre, se recouvre à l'instant d'une couche cuivreuse: on constate ainsi que le nucleus est du fer. Cependant quelques-uns des centres métalliques de ces globules magnétiques ne présentent pas cette réaction; ils ne se recouvrent pas d'une couche de cuivre. L'analyse chimique a montré qu'ils contiennent du nickel et du cobalt; probablement sont-ils formés d'un alliage de fer et de ces métaux, ainsi qu'on le constate souvent dans les météorites, peut-être aussi la présence en quantité assez grande de ces métaux empêche-t-elle le fer de montrer la réaction caractéristique de l'enduit cuivreux.

G. Rose a signalé à la périphérie de météorites riches en fer, un enduit d'oxyde magnétique, dont on comprend facilement la formation dans l'hypothèse de l'origine cosmique. En effet, les particules météoriques de fer natif, durant leur trajet au travers

de l'atmosphère, subissent une véritable combustion et, comme les parcelles de fer jaillissant de l'enclume, elles se transforment entièrement ou en partie en oxyde magnétique; dans ce dernier cas le nucleus est mis à l'abri de l'oxydation par l'enduit qui le recouvre.

On peut supposer que les météorites, en traversant l'atmosphère, se brisent en nombreux fragments, font jaillir autour d'elles des particules enflammées de fer métallique, dont les plus petits débris tombent à la surface du globe, sous forme d'oxyde de fer magnétique plus ou moins complètement fondu. Il est facile de montrer, par l'expérience, que des parcelles de fer, en brûlant, prennent la forme sphérique et qu'elles se revêtent d'une couche d'oxyde noir magnétique.

Fig. 2.



Sphérule noir avec centre métallique (60/1).

Ce sphérule est recouvert d'un enduit brillant de magnétite; il représente la forme la plus commune. La dépression qu'on remarque à la surface s'observe presque toujours dans ces sphéroles. Recueilli à 2,375 brasses, sud du Pacifique.

Fig. 3.



Sphérule noir avec centre métallique (60/1).

L'enduit d'oxyde magnétique a été brisé pour mettre à découvert le nucleus métallique, indiqué par la partie éclairée vers le centre. Recueilli à 3,150 brasses dans l'Atlantique. Lumière réfléchie comme pour la figure 2.

On trouve, associés aux grains magnétiques que l'on vient de décrire, d'autres sphérolites que nous considérons comme des *chondres*. Si l'interprétation d'une origine cosmique pour les granules magnétiques, avec centre métallique, ne paraissait pas établie d'une manière inébranlable, elle revêtirait un caractère de haute probabilité lorsqu'on tient compte de leur association avec les sphérolites de silicates dont nous avons à parler. On verra par les détails micrographiques que les sphérolites en question ont tout à fait la constitution et la structure des chondres, si fréquents dans les météorites du type le plus ordinaire. On sait, d'un autre côté, qu'on ne les a jamais signalés dans les roches d'origine terrestre.

La présence de ces corpuscules dans les sédiments marins et leur association avec les sphérolites métalliques, est donc d'une importance capitale. Faisons connaître les traits qui distinguent ces globules de silicates et sur lesquels nous nous appuyons pour leur attribuer une origine cosmique.

Parmi les particules magnétiques extraites au barreau aimanté des sédiments pélagiques, on observe des granules un peu plus grands que ceux à enduit noir brillant décrits plus haut. Les sphérolites en question sont brun-jaunâtre à éclat bronzé; au microscope, on remarque que leur surface est striée au lieu d'être lisse comme celle des sphérolites à centre métallique. Leur diamètre n'atteint jamais un millimètre; il est d'environ 0^{mm},5 en moyenne. Ils ne

Fig. 4.



Sphérolite de bronzite ($^{25}/_1$) montrant l'aspect des chondres trouvés dans les sédiments de mer profonde. Recueilli à 3,500 brasses, sud de l'océan Pacifique.

sont jamais parfaitement sphériques, comme c'est le cas pour les globules noirs brillants; on voit presque toujours à la surface un enfoncement plus ou moins prononcé. L'examen microscopique montre que les lamelles qui les constituent sont appliquées les unes contre les autres, affectant une disposition radiale excentrique. C'est la structure radiale feuilletée (*radial-blättrig*) caractéristique des chondres de bronzite qui domine dans nos préparations; nous y avons entrevu beaucoup plus rarement la structure grenue des chondres à olivine, et encore ne donnons-nous cette dernière indication qu'avec doute, vu les difficultés d'observation. La figure n° 4 montre ces caractères de texture tels qu'ils apparaissent sous un grossissement d'environ $^{25}/_1$.

Les petites dimensions de ces globules et la friabilité due à leur texture lamellaire rendent le polissage difficile; nous avons dû les étudier à la lumière réfléchie, ou nous borner à en examiner de minces éclats. Ces chondres se brisent suivant les lamelles; on observe qu'elles sont extrêmement fines et parfaitement transparentes. En s'orientant sur les clivages, on constate qu'elles ont les extinctions du système rhombique; à l'aide du condenseur on voit qu'elles sont à un axe optique; on constate aussi que lorsque plusieurs de ces lamelles sont attachées, elles éteignent sensiblement en même temps; tout porte à croire qu'elles forment un seul individu.

Si l'on étudie ces éclats transparents et très minces à l'aide des forts grossissements du microscope, on découvre qu'ils sont criblés d'inclusions brun-noirâtre disposées avec une certaine symétrie et offrant des contours vaguement réguliers rappelant les cristallites; nous rapportons ces inclusions au fer magnétique. Leur présence explique comment ces sphérules de bronzite se laissent extraire à l'aimant, tout en étant cependant beaucoup moins magnétiques que les sphérules noirs à enduit luisant et centre métallique.

Nous rapportons ces chondres à la bronzite plutôt qu'à l'enstatite, à cause de la teinte un peu foncée qu'ils présentent. Ils sont insolubles dans l'acide chlorhydrique; le peu de substance à notre disposition ne nous a permis que d'en faire l'analyse qualitative: ils renferment de la silice, de la magnésie et du fer.

Nous devons nous borner à ces détails succincts; mais nous croyons en avoir dit assez pour montrer que ces corps globulaires se rapprochent par tous leurs caractères essentiels des chondres des météorites dont, dans notre pensée, ils partagent le mode de formation. Ajoutons encore que nous trouvons ces sphérules, non seulement dans les sédiments, mais aussi dans les concrétions de manganèse. Si l'on vient à écraser les nodules manganésifères ou les enduits de cette substance qui recouvrent les dents de squales, on peut extraire à l'aide du barreau aimanté des sphérules métalliques et silicatés qui sont identiquement les mêmes que ceux que l'on recueille dans les sédiments qui renferment ces nodules.

Nous avons examiné récemment les poussières obtenues comme résidu de la fusion des neiges qui recouvrent le sommet du Ben Nevis, près du nouvel observatoire météorologique. Les sédiments atmosphériques tombés dans cette région élevée et isolée ne nous ont pas montré de particules volcaniques ou de sphérules analogues

à ceux que nous avons décrits dans cette notice. Les poussières de Ben Nevis, que nous avons étudiées au microscope, sont composées surtout de parcelles de houille, de fragments de scories et de grains de quartz. Nous avons constaté en outre des débris de minéraux de toutes formes et de dimensions variables ; nous pouvons signaler parmi les espèces observées : la calcite, le mica et l'augite (?) et quelques grains de roches. A ces matières minérales étaient associés des fibres végétales, des éclats limoniteux, de l'étain, etc. : tout nous indique pour ces poussières une origine terrestre.

Afin de donner une idée de la facilité avec laquelle les vents peuvent transporter ces matières au sommet de cette montagne, il suffira de rappeler que le météorologue, M. Omond, nous a envoyé des fragments de roches cristallines dont quelques-uns mesuraient 2 centimètres de diamètre et qu'il avait ramassés sur la neige près de l'observatoire, le lendemain de l'ouragan du 26 janvier 1884.

Pour permettre de poursuivre les études sur les poussières atmosphériques, on vient de prendre des dispositions spéciales dans le but de les recueillir au sommet du Ben Nevis dans les conditions les plus favorables.



