

Hydrothermal
Mineralogie
Géochimie
Arc insulaire
Vulcano

Hydrothermal
Geochemistry
Mineralogy
Island arc
Vulcano

Héritage et néoformation dans les dépôts volcano-sédimentaires et hydrothermaux avoisinant l'île de Vulcano

A. Monaco ^a, J. N. Valette ^a, M. Hoffert ^b, P. Picot ^c

^a Centre de Recherches de Sédimentologie Marine, Perpignan, France.

^b Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Strasbourg, France.

^c Bureau de Recherches Géologiques et Minières, Orléans, France.

Reçu le 12/2/78, révisé le 29/6/78, accepté le 10/7/78.

RÉSUMÉ

L'étude des dépôts volcano-sédimentaires avoisinant l'île de Vulcano (Italie) permet d'établir leurs caractéristiques et de différencier quatre phases : phase détritique d'origine insulaire et sicilienne; phase organique siliceuse ou carbonatée; phase des minéraux de néoformation; phase de précipitation. L'accent est mis sur les formations d'argiles et les minéralisations de fer et de manganèse. Des présomptions existent en faveur de la formation de kaolinite autour des événements hydrothermaux littoraux et de la smectite dans le domaine plus profond. Dans la baie du Levant, les minéralisations de fer présentent, de la côte vers le large, une certaine zonéographie qui obéit aux variations physicochimiques du milieu. La melnicovite, la pyrite, la marcassite et la pyrrhotine se déposent en auréoles autour des fumerolles peu profondes. Au voisinage de la source hydrothermale côtière le fer précipite sous forme d'hydroxydes amorphes. La goéthite et l'hématite caractérisent l'ensemble du domaine bathyal. Les minéralisations en manganèse sont exclusivement représentées par des hydroxydes et des oxydes, localement (vers - 250 m) organisés en patines autour de grains de verre (micronodules). Elles paraissent principalement liées à la source hydrothermale.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 1, 75-90.

ABSTRACT

Heritage and neof ormation in volcanic and hydrothermal sediments surrounding Vulcano Island

The volcanic deposits which surround Vulcano Island may be classified in four phases : a detritic phase, fed from the Island itself and from Sicily; a siliceous and carbonateous organic phase; a neogenesis mineral phase; a precipitation phase. The formation of clay and the mineralization of iron and manganese are the subject of particular study. A number of indications suggest the littoral neogenesis of kaolinite around hydrothermal issues, and the formation of smectite at greater depths. The distribution of iron mineralization in the *Baie du Levant* follows the physicochemical variations of the environment. Melnikovite, pyrite, marcassite and pyrrhotin are dispersed in aureoles around swallow emission points (fumaroles). Close to the hydrothermal spring, iron precipitates are found in the form of amorphous hydroxydes, while goethite and hematite characterize the deeper area as a whole. Manganese mineralizations are exclusively represented by hydroxides and oxides, locally (about - 250 m) organized as incrustations on lapilli glasses (micronodules). These would appear to be related to the hydrothermal spring.

Oceanol. Acta, 1979, 2, 1, 75-90.

INTRODUCTION

Dans les arcs volcaniques, les caractères du milieu volcano-sédimentaire péri-insulaire sont conditionnés par : la position structurale qui détermine la nature des roches de l'édifice volcanique; la nature des émissions gazeuses, liquides et solides; le type et la durée de l'altération subaérienne des roches et des sédiments; les mécanismes de transport et de mise en place des matériaux autochtones et allochtones (bassins adjacents); les caractères de la faune et de la flore benthique et planctonique qui constituent la phase biogène du dépôt.

Dans la plupart des cas, les études sont centrées sur l'un ou l'autre de ces aspects, par exemple : la pétrographie des roches (Keller, 1967, 1970 *a* et *b*; Treuil, Varet, 1973), la nature des gaz éruptifs (Elskens, Tonani, 1969; Elskens *et al.*, 1969; Le Guern, 1972; Tazieff, 1970; Tazieff *et al.*, 1972), ou les minéralisations contiguës aux émissions hydrothermales (Bonatti, 1965; Boström, 1970; Boström, Peterson, 1966; Butuzova, 1969; Honnorez, 1967, 1969; Puchelt, 1973; Turekian, 1965).

Rarement, la liaison entre ces différents paramètres a été réalisée. Aussi l'île de Vulcano a-t-elle été choisie comme cadre d'une étude qui fait la synthèse des divers aspects du volcanisme (Valette, 1969, 1977).

Le présent travail traite plus spécifiquement des processus de la sédimentation marine dans l'environnement volcanique et tente de faire la part entre l'héritage (produits solubles et solides issus de l'érosion de l'appareil volcanique et/ou du continent sicilien) et les néoformations liées aux manifestations volcaniques tardives (fumerolles et sources hydrothermales). Les dimensions réduites du site favorisent une meilleure approche du phénomène volcano-sédimentaire.

CADRE GÉOLOGIQUE

Vulcano s'étend de 38°26' à 38°22' de latitude Nord et de 14°36' à 14°41' de longitude Est (fig. 1). Située au nord de la Sicile, l'île est constituée par la coalescence de quatre unités géologiques (Bergeat, 1899; Pichler, 1970; Keller, 1970 *a* et *b*) :

- au sud, Piano, unité à basaltes et andésites d'âge thyrhézien;
- à l'ouest, Lentia, édifiée par des liparites d'âge würmien;
- au nord, la presqu'île de Vulcanello formée par des basanites à leucite (183 av. J.C);
- au centre et à l'est, Fossa, l'unité la plus récente et composée de trachytes calcoalcalins et d'obsidiennes.

L'étude est surtout centrée sur la marge continentale et la Baie du Levant qui s'ouvre à l'est de l'île entre les reliefs de Vulcanello et de la Fossa (fig. 1 *a*).

C'est dans la partie récente de l'île que sont concentrées les émissions hydrothermales actuelles, aériennes et sous-marines (sources et fumerolles) qui surgissent à la faveur d'un champ de fractures de direction SW-NE. Dans l'anse septentrionale de la Baie du Levant (fig. 1 *b*),

il existe deux champs fumerolliens, Caminiti au nord, Acqua Calda et Acqua Bollente au sud qui s'étendent de manière continue de la plage jusqu'au domaine marin littoral (environ 20 m de profondeur). Dans l'anse méridionale de la Baie, la source de Pietre Bianche émerge à la limite des eaux marines, au pied de la falaise de Fossa (fig. 1 *b*).

MÉTHODOLOGIE

Dans la Baie, il faut distinguer la prospection des champs fumerolliens et de la source hydrothermale de celle du domaine plus profond. Dans le premier cas, l'échantillonnage doublé de l'observation directe a été effectué par plongée autonome. Les prélèvements sériés à partir des événements (0, 10, 20, 50 cm, 1, 2 m) sont au nombre d'une soixantaine. Dans le second cas, les prélèvements, essentiellement par benne, s'alignent sur trois radiales depuis les fonds d'une vingtaine de mètres jusqu'à la profondeur de 1 000 m environ, soit au total une vingtaine d'échantillons.

Les dépôts marins des milieux volcano-sédimentaires doivent être considérés comme un ensemble de populations. Nous avons choisi d'appréhender cet ensemble par une reconnaissance globale chimique et minéralogique du sédiment, puis d'appliquer à chaque fraction les méthodes adéquates.

Figure 1

Situation géographique et géologique de l'île Vulcano :

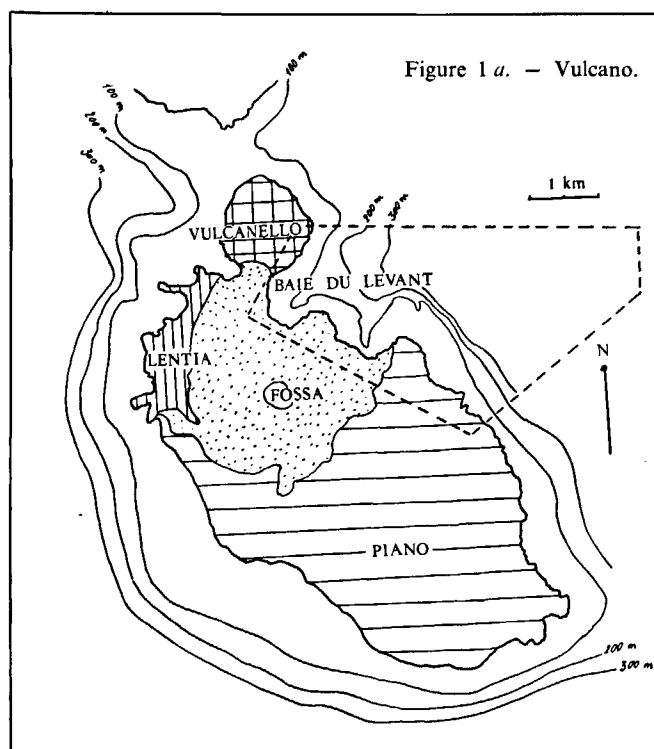
a) carte géologique schématique;

b) détail de la Baie du Levant : bathymétrie, position des émissions hydrothermales et des prélèvements.

Geographic and geologic map of Vulcano Island:

a) schematic geologic map;

b) detail of the Baie du Levant: bathymetry, location of hydrothermal emissions and sampling stations.

Figure 1 *a*. — Vulcano.

Le sédiment est lyophilisé pour bloquer les réactions chimiques et bactériennes susceptibles de se produire durant la période de stockage. L'échantillon, lavé à l'eau distillée, est ensuite dispersé aux ultrasons et agité en vue d'une séparation granulométrique par sédimentation. On isole trois fractions : sables ($> 0,040$ mm), silts ($0,010 < \theta < 0,040$ mm) et « argiles s1 » ($< 0,010$ mm) qui font l'objet d'analyses diverses :

- fraction « argileuse » :
 - diffractométrie RX sur agrégats orientés (fraction $< 2 \mu\text{m}$),
 - microscopie électronique à transmission,
 - microscopie électronique à balayage;
- fractions silteuse et sableuse :
 - diffractométrie RX sur poudre,
 - analyses pétrographiques et minéralogiques,
 - analyses morphoscopiques et chimiques ponctuelles (MEB, microsonde) après inclusion et montage des fractions en section ou lame polies,
 - analyses par activation neutronique (verres volcaniques).

COMPOSITION DES SÉDIMENTS

La marge continentale du Vulcano comprend un plateau très étroit (100 m à 1 km) relayé vers le large par une pente abrupte. Au-delà s'étendent les bassins sud-tyrrhéniens, Cefalu à l'ouest et Gioia à l'est. De manière générale, les fonds sont très accidentés : éperons rocheux, hauts fonds, canyon du rio Grande. Dans la Baie du Levant, située au NE de l'île, un replat est ménagé sur la pente, entre 150 et 300 m. L'hydrologie est conditionnée par les vents dominants du SE (Sirocco) et du NW (Ponant). De ce fait, la circulation à l'intérieur de la Baie se limite à une entrée d'eau profonde vers le NW et une sortie des

eaux de surface vers le SE. Ces mouvements sont favorisés par la constitution d'une strate superficielle chaude engendrée par les émissions hydrothermales (Valette, 1977).

Le trait dominant de la sédimentation marine dans les fonds avoisinants l'île, entre 0 et 300 m de fond, est l'importance des dépôts grossiers et hétérométriques. La fraction fine pélitique, toujours inférieure à 50 % dans cet intervalle bathymétrique, ne devient dominante (70 %) que dans les bassins, à partir de 1 000 m de profondeur.

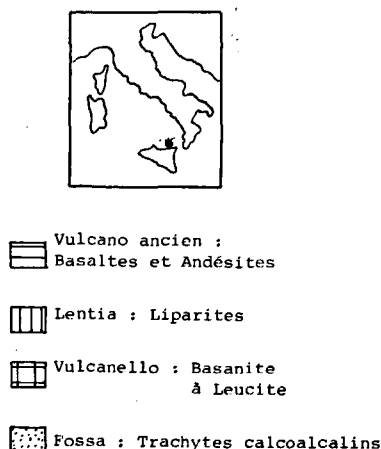
Les débris de roche et les verres constituent la partie essentielle de la fraction grossière de ces dépôts. En outre, on reconnaît, en proportion variable, des minéraux lourds (augite, olivine, diopside, apatite), légers (plagioclases, sanidine, quartz) et opaques (sulfures et oxydes).

Dans la fraction pélitique ($< 40 \mu\text{m}$), à des matériaux identiques à ceux de la fraction grossière, s'ajoutent du matériel amorphe en partie issu des verres, ainsi que des minéraux argileux bien cristallisés : illite, kaolinite, smectite, halloysite.

Dans la phase organogène apparaît un antagonisme entre organismes siliceux (Diatomées) et calcaires (Coccolithophoridés, Foraminifères), les seconds venant relayer les premiers vers le large, dès 200 m de fond.

Les sédiments marins de la Baie du Levant possèdent les caractéristiques des milieux volcano-sédimentaires, c'est à dire qu'ils se distinguent des sédiments marins banaux (El Wakeel, Riley, 1961) par de fortes teneurs en silice (55,80 contre 42,72 %), en alcalins et alcalino-terreux (teneurs de 2 à 3 fois plus élevées). Les teneurs moyennes en éléments en traces ne reflètent qu'exceptionnellement la spécificité de ce milieu (Wedepohl, 1960; Chester, 1965; Valette, 1977).

Figure 1 b. — Détail de la baie.



Cette composition chimique moyenne (moyenne arithmétique de 40 échantillons) et notamment le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ égal à 2,7, représente en fait le mélange entre les deux principales sources de matériaux détritiques : la Fossa province acide caractérisée par un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ égal à 4,4 et Vulcanello édifice basique où ce rapport ne dépasse guère 3,1.

Dans le détail, les variations de la composition chimique des sédiments sont assujetties d'une part à l'influence très ponctuelle des venues hydrothermales, d'autre part au facteur bathymétrique. Au voisinage des fumerolles l'altération sous-marine entraîne un appauvrissement d'environ dix fois en SiO_2 , CaO , MgO , K_2O , Na_2O , compensé par l'apport hydrothermal de S (jusqu'à 200 fois plus). Le gradient bathymétrique introduit une variation surtout au niveau des teneurs en SiO_2 et en Al_2O_3 , ce qui correspond à l'augmentation de la quantité de phyllosilicates dans la fraction pélitique (rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ passant de 4,5 à la côte à 3,7 au large).

La variabilité des concentrations d'éléments tels que fer et manganèse est le caractère le plus spécifique du milieu volcano-sédimentaire marin. Bien que dans les sédiments la composition moyenne n'exède pas 5,2% pour le fer et 1 300 ppm pour le Mn, ils peuvent se concentrer localement. Le fer peut atteindre 28% autour des fumerolles (précipitation des sulfures) et 32% dans les précipités d'oxyhydroxydes hydrothermaux (Source de Pietre Bianche). Dans les deux cas il reste cantonné au domaine peu profond. Par contre, c'est au centre de la Baie et dans les creux bathymétriques (fosse et replat) que le manganèse dépasse localement 5 000 ppm.

Verres volcaniques et minéraux silicatés

Les verres volcaniques

Issu de la désagrégation des formations à l'affleurement (obsidiennes, trachytes, trachybasaltes, basanites, cinérites) mais également des venues directes de pyroclastites de la dernière éruption, le verre est présent dans toutes les classes granulométriques des dépôts. Le matériel vitreux constitue plus de 50% du sédiment. Il présente deux types pétrographiques principaux : hyalin et à microlithes; à l'intérieur de ces deux classes, on distingue les variétés claires et sombres (pl. 1 a et 1 b). Du point de vue morphologique on reconnaît des grains vacuolaires, esquilleux, lisses (pl. 1 c, 1 d) et, parfois, à surface très irrégulière (pl. 1 e). La première catégorie appartiendrait aux éjectats ayant subi un refroidissement rapide. Il n'existe pas de relation apparente entre les caractères pétrographiques, chromatiques et morphologiques. Les verres sont également peu différenciés chimiquement, si ce n'est un léger

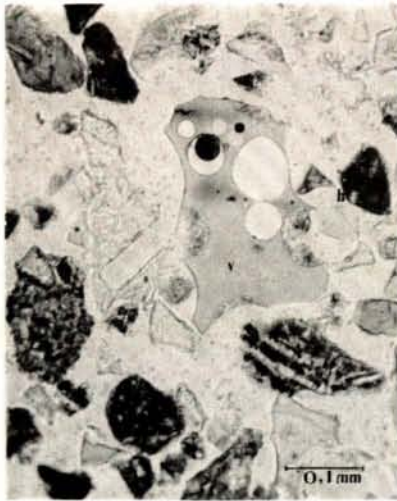
Planche 1

Composition de la fraction grossière ($> 40 \mu\text{m}$) des sédiments. a, b : Deux échantillons (lames polies et MO) montrent la variété des verres (V) volcaniques (massifs ou vacuolaires, hyalins ou à microlithes, sombres ou clairs) à côté de rares minéraux lourds (a : augite; m : magnétite; h : hydroxydes).

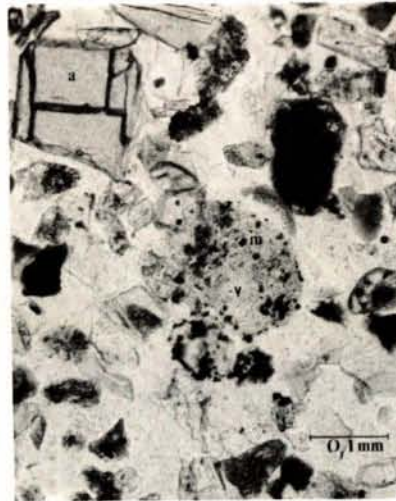
c, d, et e : Morphologie de quelques verres (MEB); variétés vacuolaires (C), esquilleuse (D) et à surface irrégulière (E).

Composition of the coarse fraction ($> 40 \mu\text{m}$) of the sediments. a, b: Two samples (polished slides and optic microscopy) showing the different categories of volcanic glass particles (compact or vacuolar, hyalin or with microlithes, brown or white) and heavy minerals (a: augite; m: magnetite; h: hydroxydes).

c, d, e: Morphology of some kind of glasses (EM) with vacuols (C) ledges (D) and irregular surface (E).



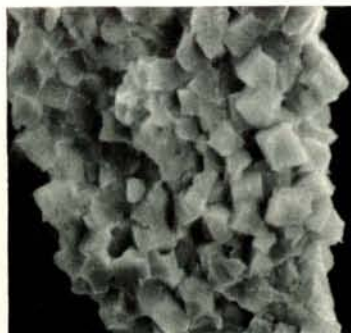
a



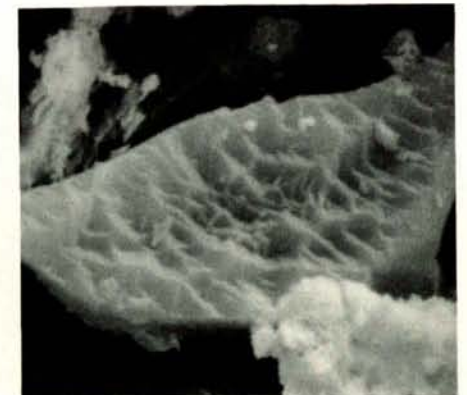
b



c



d



e

accroissement du manganèse dans les types foncés (Valette, 1977).

Pour appréhender d'éventuels phénomènes d'altération, plusieurs tests ont été effectués sur des grains montés en lames ou sections polies : dosages semi-quantitatifs ponctuels au MEB, images de répartition et traversées à la microsonde électronique. A l'intérieur d'un même grain hyalin, les quantités relatives en potassium et calcium varient mais sans montrer de tendance nette entre le centre et la périphérie. Un certain antagonisme apparaît entre la silice et le fer, ce dernier migrant fréquemment vers les bords ou les fissures intragranulaires. Cette tendance à la ferruginisation a déjà été signalée dans des conditions expérimentales (Trichet, 1970).

Les phénomènes de dévitrification sont plus communément observables et s'accompagnent globalement d'une perte en aluminium et d'un enrichissement en fer et en potassium. Cette dévitrification aboutit à une cristallisation plus ou moins importante de microlites et à une micro-hétérogénéité du verre à la périphérie du grain ou dans les vacuoles (Picot, Ragot, 1973); elle ne conduit jamais à la zéolitisation (Honnorez, 1967) peut-être en raison de la jeunesse du matériel ou du caractère peu profond du volcanisme sous-marin.

Les silicates

Les plagioclases et l'augite sont les silicates les plus fréquents des sédiments des zones littorales ou bathyales de Vulcano. Les plagioclases sont situés vers le pôle basique de la série albite-anorthite ($\alpha = 31\%$, labrador à 55% An); leur composition chimique varie peu : Na_2O de 3,88 à 5,24 %, CaO de 9,16 à 12,40 %.

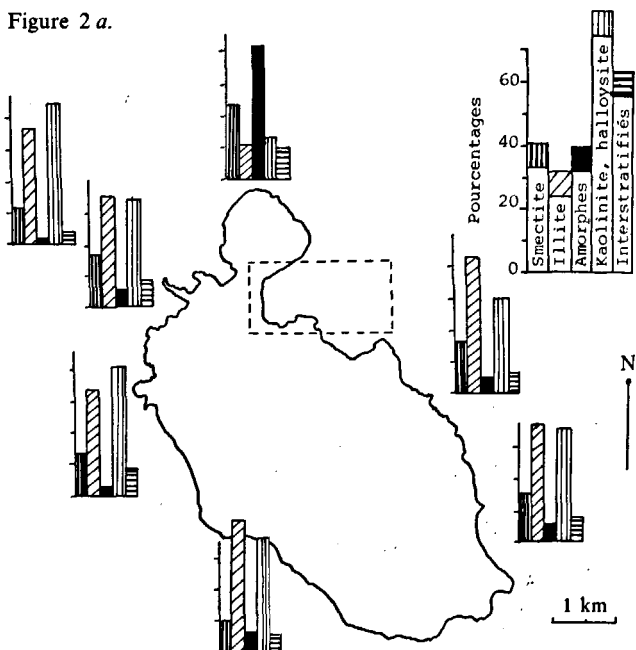
Figure 2

Histogrammes de fréquence des différents minéraux argileux contenus dans les sédiments marins de Vulcano :

- a) répartition générale autour de l'île;
b) répartition dans la Baie du Levant.

Remarques : la position des histogrammes est celle des échantillons; le pourcentage en « amorphe » est apprécié sur les diffractogrammes RX par la hauteur d'une protubérance vers 8-9 Å.

Figure 2 a.



Tableau

Analyses à la microsonde de plagioclase, de sanidine, de pyroxène et de verre (variété claire) de la zone d'Acqua Calda (Baie du Levant).

Microsond analysis of plagioclase, sanidine, pyroxene and transparent glass in the Acqua Calda (Baie du Levant) area.

Éléments (%)	Sanidine	Plagioclases	Pyroxène	Verres clairs
Na_2O	0,83	3,88	-	2,75
MgO	0,03	0,04	15,50	1,16
Al_2O_3	27,14	28,17	1,80	17,54
SiO_2	61,44	53,18	53,60	63,21
K_2O	5,90	0,97	-	7,26
CaO	3,80	12,40	23,32	2,36
MnO	-	-	0,10	-
TiO_2	-	0,02	0,26	0,41
FeO_x	0,50	0,51	5,35	5,45
TOTAL	99,64	99,17	100,03	100,14

De même, la composition chimique des pyroxènes est stable (tableau), exception faite pour le fer (de 5,35 à 8,50 %).

Les feldspaths potassiques, représentés par la sanidine, sont relativement abondants dans les sédiments côtiers. Les péridots disparaissent vers le large à partir de 20 m de profondeur, phénomène en relation avec la fragilité des grains.

Minéraux argileux

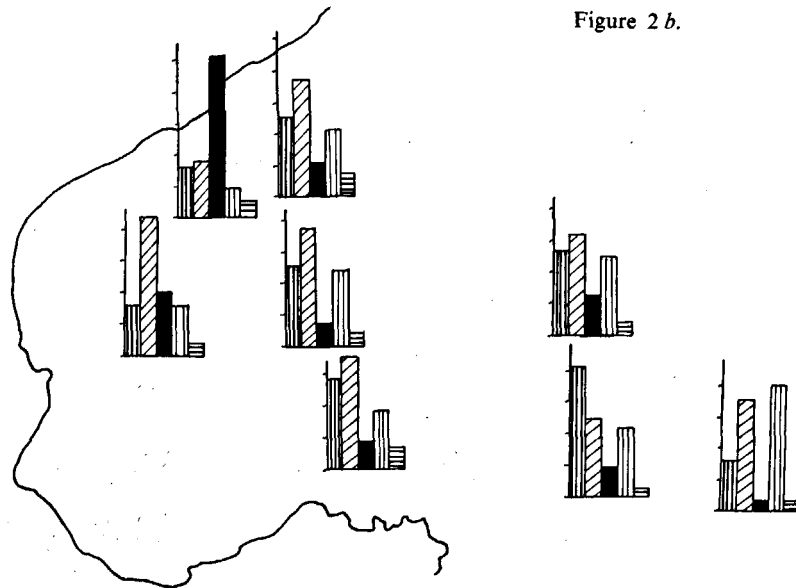
Les argiles sont associées à tous les dépôts, mais ne deviennent réellement importantes qu'à partir d'une cinquantaine de mètres de profondeur. Le cortège minéral est varié et comprend, dans l'ordre croissant de fréquence : illite, kaolinite, smectite, halloysite et interstratifiés (fig. 2). Une des principales caractéristiques de la fraction fine de ces sédiments est qu'elle contient, en proportion variable mais toujours notable, des produits amorphes : oxyhydroxydes de fer, particules

Frequency histogram of different clay minerals in the marine sediments of Vulcano Island :

- a) general distribution around the island;
b) distribution in the Baie du Levant.

Note : histogram locations are those of the samples; the "amorphous" proportion is appreciated in the X-ray diffractograms in the form of a protuberance in the vicinity of 8-9 Å.

Figure 2 b.



silico-alumineuses (allophanes-imogolite) ou silico-ferriques.

L'illite se présente en particules moirées, de taille généralement plus grande que les autres minéraux du cortège argileux (≈ 2 à $5 \mu\text{m}$). Autour de l'île, l'illite occupe une aire très large, avec des teneurs moyennes de 30%, sauf vers le nord où son pourcentage ne dépasse pas 10 à 20%.

La smectite (dioctaédrique) est présente dans les fractions les plus fines ($< 2 \mu\text{m}$); elle possède souvent un « faciès » caractéristique en particules plissées (pl. 2 a et b). Elle est plus abondante au NE de l'île et vers le centre de la Baie du Levant où sa cristallinité devient également meilleure, le rapport v/p atteint alors 0,70 (Biscaye, 1965).

Cette morphologie semble liée à de nombreux sites volcaniques, qu'il s'agisse de produits d'altération météorique (Beutelspacher, Van der Marel, 1968) comme il

en existe sur l'édifice même de Vulcano (Monaco, Valette, 1978) ou de néoformations sous-marines (Hoffert *et al.*, 1976). Dans quelques échantillons des structures analogues apparaissent sur les bords des squelettes de Diatomées en voie de dissolution (pl. 2 b).

La kaolinite en cristaux hexagonaux de taille très variable ($0,1$ à $3 \mu\text{m}$) a approximativement la même distribution que l'illite, les pourcentages passant de 10 à 45%. Une des caractéristiques du minéral est sa présence à tous les étages bathymétriques et dans les faciès les plus côtiers y compris au sein des précipités amorphes de la source hydrothermale. Il présente une grande diversification morphologique : particules granulaires ou globuleuses, petites plaquettes homogènes, structures en mosaïques (pl. 2 c, 2 d).

L'halloysite, le plus souvent en petites baguettes de moins de $0,5 \mu\text{m}$ de long, est largement distribuée et associée à tous les types de dépôts, surtout les plus

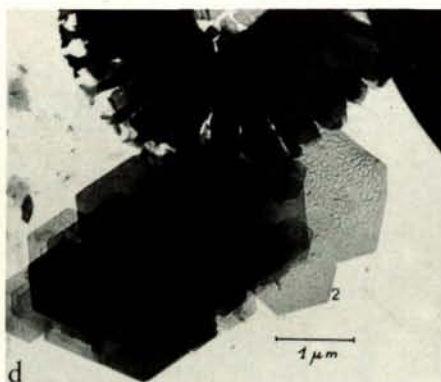
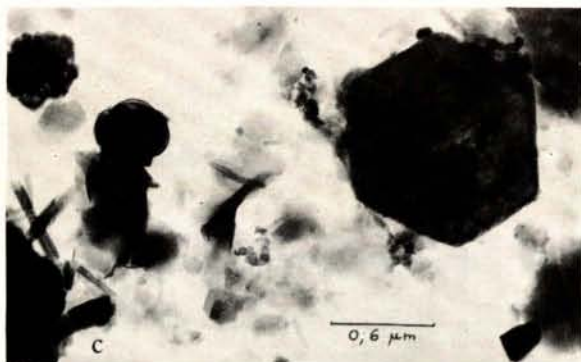
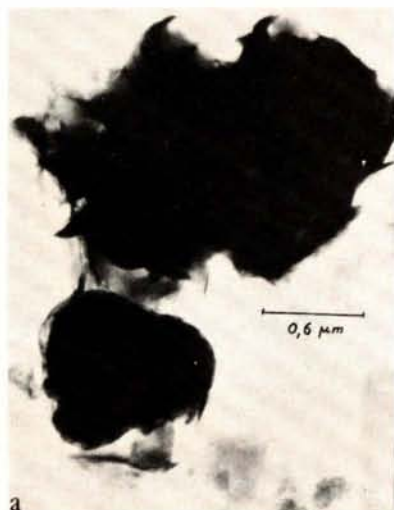


Planche 2

Association argileuse dans les sédiments marins de Vulcano (MET).

a, b : Smectite à bords plissés; certaines structures plissées paraissent dériver de restes de Diatomées.

c : Association de kaolinite et halloysite.

d : Kaolinite en mosaïque (2).

e : Fibres d'halloysite en paquets (1).

Clay mineral association in marine sediments of Vulcano Island.

a, b: Smectite with plicated edges; some plicated structures seem to be originated from diatoms skeletons.

c: Some aspects of kaolinite association with halloysite.

d: Mosaic kaolinite (2).

e: Halloysite fibers in packets (1).

profonds (pl. 2 c); on la rencontre parfois même en paquets (pl. 2 e). On sait que ce minéral constitue, avec la smectite, les phyllites issues de l'altération continentale des trachytes ou des cinérites de Vulcano (Monaco, Valette, 1978).

Minéraux de fer

Dans les sédiments de Vulcano, le fer existe dans les verres, dans de nombreux minéraux (ferromagnésiens, feldspaths...), dans les argiles et surtout dans les hydroxydes cryptocristallins. On peut distinguer, selon l'environnement, les paragenèses sulfurées et oxydées.

Les sulfures

Le sulfure de fer le plus courant est la pyrite qu'accompagnent fréquemment la melnicovite, la marcassite et la pyrrhotine (pl. 3). Dans la zone infralittorale, jusqu'à 15 m de profondeur, les minéralisations se développent en auréoles d'une vingtaine de centimètres autour des fumerolles sous-marines. Les sulfures de fer se présentent presque toujours en patines (pl. 3) autour de minéraux riches en fer (magnétite, verre, etc.) et dans les alvéoles inter et intragranulaires. Les patines sont souvent dues à la coalescence de petites pyritosphères (pl. 2 c) ou au dépôt de couches succes-

sives plus ou moins continues de melnicovite, pyrite, marcassite (pl. 3 c et d). On note également la succession pyrite-marcassite à l'intérieur même des pyritosphères (sphérule à noyau framboïdal, Honnorez, 1969; Honnorez *et al.*, 1973).

Dans les dépôts plus profonds du centre de la baie du Levant, seules persistent de petites pyritosphères, très dispersées au sein de la vase (Bouysse *et al.*, 1966).

L'analyse chimique de diverses pyrites à la microsonde montre qu'il existe pour les patines continues une certaine « digestion » du minéral support. Ainsi, on retrouve dans le sulfure certains éléments appartenant à la magnétite (Ti, Cr, K, Al). De même, le rapport Fe/S varie et passe de 1 à 2 avec les formes successives : FeS, Fe₃S₄, Fe₂S₃ et FeS₂. Le passage melnicovite pyrite s'effectue avec perte d'eau, ce qui explique les formes en « hélices » fréquentes (pl. 3 d). Par contre, les pyritosphères sont de composition beaucoup plus monotones et incorporent seulement de la silice.

Les oxydes

On rencontre communément 4 oxydes : magnétite, hématite, goéthite et plus rarement ilménite, répartis

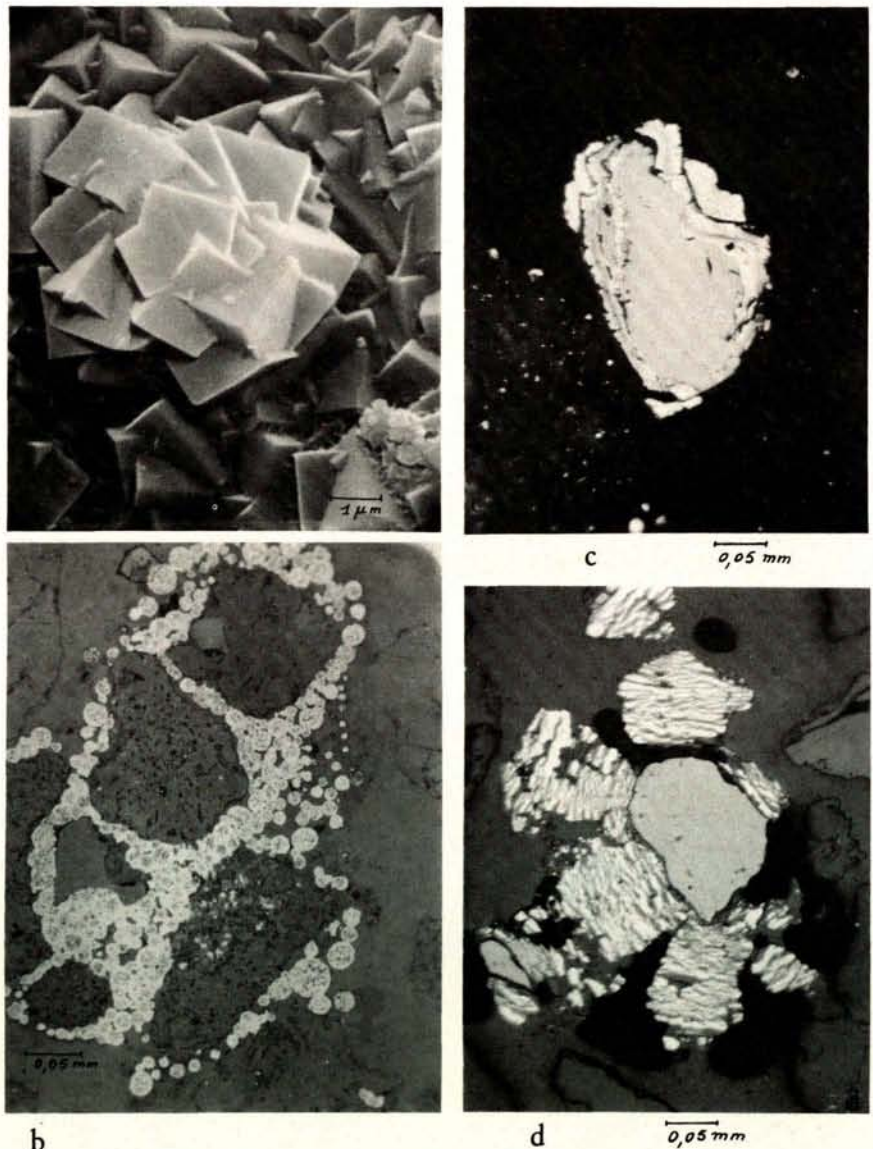


Planche 3

Sulfures associés aux dépôts littoraux, de la Baie du Levant (0 à 15 m de profondeur).
a : Détail des cristallisations de pyrite développées sur un grain de verre (MÉB).

b : Patine intergranulaire formée par la coalescence de pyritosphères (MO).

c : Dépôts successifs de melnicovite, pyrite et marcassite autour d'une magnétite (MO).

d : Structure en hélice de la pyrite développée autour de magnétite. Cette structure est due à la perte en eau de la melnicovite primitive.

*Sulphides associated with littoral deposits in the Baie du Levant (bathymetry from 0 to 15 m).
a: Detail of the crystallization of pyrite developed on a glass lapilli.*

b: Intergranular crust formed by joint pyritospheres.

c: Successive deposits of melnicovite, pyrite and marcassite around a magnetite grain.

d: Helical structure of the pyrite developed around a magnetite; this structure is originated by the loss of water from the initial melnicovite.

très largement dans toute la baie, sauf dans le périmètre immédiat des émissions fumerolliennes.

— Les cristaux de *magnétite* subissent dans les sédiments de la marge continentale une décroissance de taille de la côte (ϕ 300 μ m) vers le large (ϕ 50 μ m environ à 1 000 m). Ils se présentent le plus souvent en grains isolés (pl. 1 et 4 a), mais également incorporés à des débris rocheux ou vitreux. Les magnétites de ces milieux sont toujours titanifères et manganésifères, parfois chromifères. L'analyse des magnétites des faciès littoraux d'Acqua-Calda (Baie du Levant) donne les résultats suivants : Fe_2O_3 , 78,33 %; TiO_2 , 8,62 %; Al_2O_3 , 5,35 %; MgO , 3,85 %; MnO , 0,59 %. La silice (jusqu'à 3 %), le nickel (< 200 ppm) et le vanadium (< 200 ppm) s'y trouvent occasionnellement.

— L'*hématite* paraît plus spécifiquement liée au faciès pélitique (sables vaseux et vases), où elle se trouve en grains isolés de l'ordre de 50 à 100 μ m. Elle est généralement d'aspect « granulaire » et de composition hétérogène. Elle renferme très régulièrement Fe, Si, Al, Mn et de nombreux autres éléments à l'état de traces (Mg, Ti, etc.). Les images X de répartition de ces éléments, notamment Si et Al, soulignent le caractère polycristallin de ces particules, par ailleurs souvent riches en eau (hydrohématite, pl. 4 b).

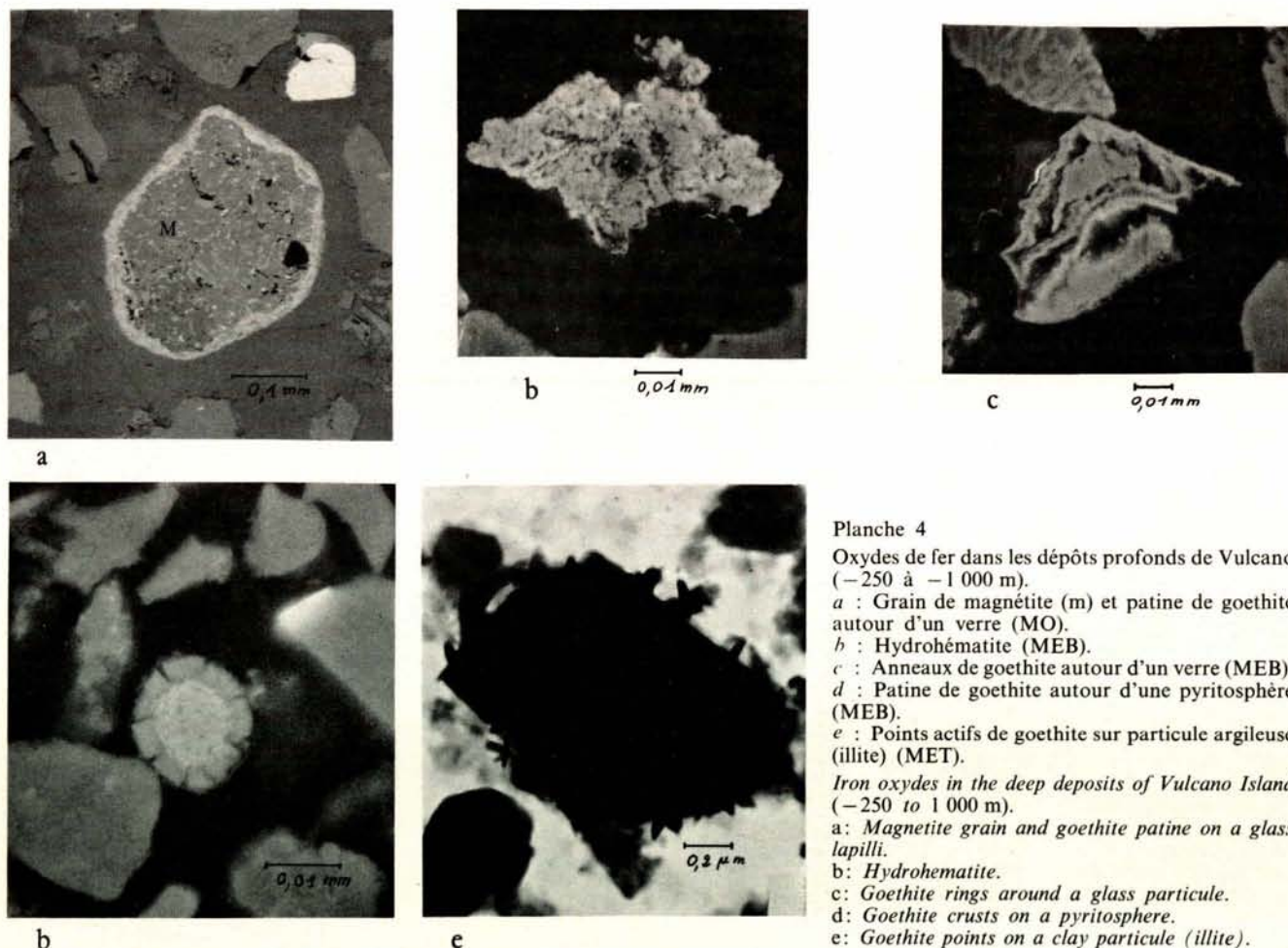
— La *goethite* suit la répartition de l'hématite, mais apparaît plus précocement au niveau de la source de Pietre Bianca (sud de la Baie du Levant). A Vulcano, ce minéral se rencontre sous quatre faciès : en grains

isolés (de 0,1 à 3 μ m) (pl. 8 e), en patines autour de débris minéraux, verres et olivine (pl. 4 a et c), en auréoles autour de pyritosphères (pl. 4 d), en points actifs sur les argiles (pl. 4 e) (Beutelspacher, Van der Marel, 1968). Le passage entre le minéral support et les patines est toujours très net. Ces minéralisations contiennent outre le fer, du silicium, de l'aluminium, du calcium, parfois du titane, du manganèse et du magnésium.

Minéraux du manganèse

Nous avons vu précédemment que de nombreuses particules contiennent du manganèse en faible proportion ou en trace, en particulier les verres, la magnétite, l'hématite et les pyroxènes. Cependant, le manganèse se trouve surtout dans divers oxydes dont le plus fréquent est la manganite (γMnOOH). La birnessite apparaît au-delà de 50 m de profondeur dans les sédiments pélitiques. A ces minéraux s'ajoutent la feitknechtite (βMnOOH) et la braunite ($\text{MnO}, 3\text{Mn}_2\text{O}_3, \text{SiO}_2$) dans les précipités qui marquent le débouché de la source hydrothermale, la todorokite dans les dépôts du centre de la baie (déterminations effectuées par E. A. Perseil).

Ces minéraux sont communément associés aux dépôts métallifères sous-marins où ils possèdent souvent une faible cristallinité et sont associés, comme à Vulcano, à des produits amorphes (Perseil, Pinet, 1977; Perseil, Leclaire, 1977).



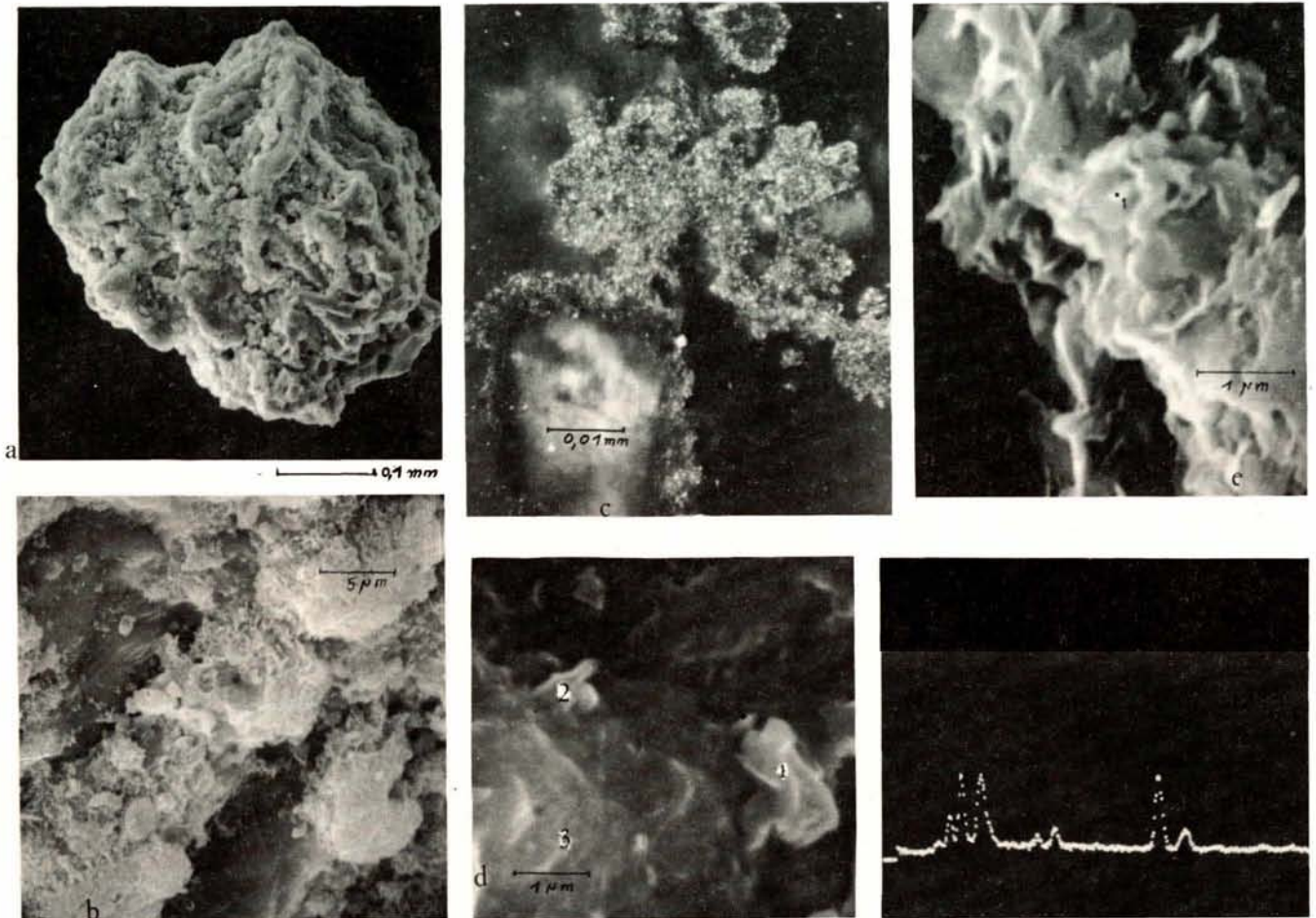


Planche 5

Minéralisations de manganèse.

a, b : Micronodule de manganèse : morphologie et détail de la surface (MEB).
 c : Section polie montrant un micronodule (patine de Mn sur verre) et des minéralisations en « oursins » (photo Perseil).
 d : Minéralisations en « bourgeons » (1 et 2) sur grain de verre (3) dans les sédiments profonds (1 000 m) (MEB).

e : Fines minéralisations ferro-manganésifères développées sur un verre (spectre d'énergie correspondant au point 1) (MEB).
 Manganese mineralizations.
 a, b : Manganese micronodule: morphology and detail of the surface.
 c: Manganese mineralizations: micronodule and particles.
 d, e: development of small mineralizations on a glass grain in deep deposits (1 000 m) (SEM-EMP point 1 on e).

Comme les oxydes de fer, les oxydes de manganèse prennent diverses formes (pl. 5 et 6 : cristallites isolés de quelques microns regroupés en oursins avec ou sans noyau (Valette, 1977), en patines plus ou

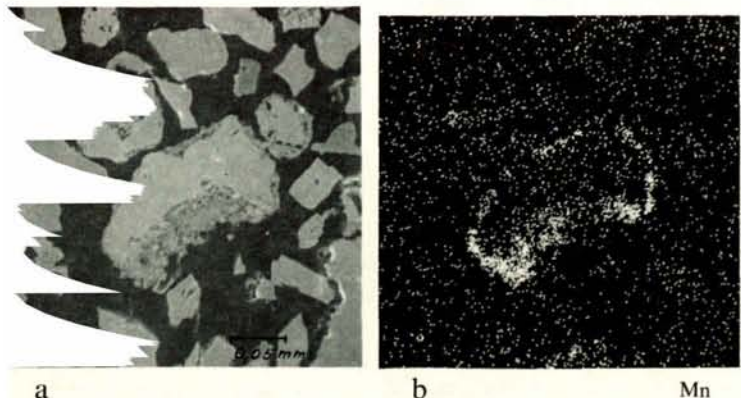
moins continues désignés sous le terme de « micronodules » (Monaco, Valette, 1976).

Planche 6

a : Patine ferro-manganésifère autour d'un grain de verre (profondeur : 250 m) (MEB).
 b : Image de répartition du manganèse (MEB).
 Ferromanganese crust (a) on a glass lapilli (deep: 250 m); scanning of the Mn (b).

Ces patines se constituent le plus souvent autour de grains de verre de l'ordre de 150 μm, en couches successives. Les « micronodules » (pl. 5 a et b, 6) se trouvent dans une aire restreinte de la Baie caractérisée par : une bathymétrie de l'ordre de 250 m, un replat de la pente continentale, un régime hydrodynamique relativement calme et un dépôt hétérométrique où coexistent éléments grossiers et fraction pélitique relativement abondante et enrichie en smectite. Le noyau et le cortex sont chimiquement différenciés; les analyses effectuées à la microsonde donnent, pour le cœur, la composition classique des verres (calciques ou potassiques). Le cortex est presque exclusivement constitué par le manganèse, auquel s'ajoutent des traces de magnésium, calcium, aluminium, silicium. Toutefois, dans la même zone existent des patines mixtes à fer et manganèse, ce dernier étant plus concentré à la périphérie.

Dans la zone bathyale, seuls des « bourgeons » de manganèse sur du verre subsistent (pl. 5 d). Ils renferment soit exclusivement du manganèse, soit du fer et du manganèse associés.



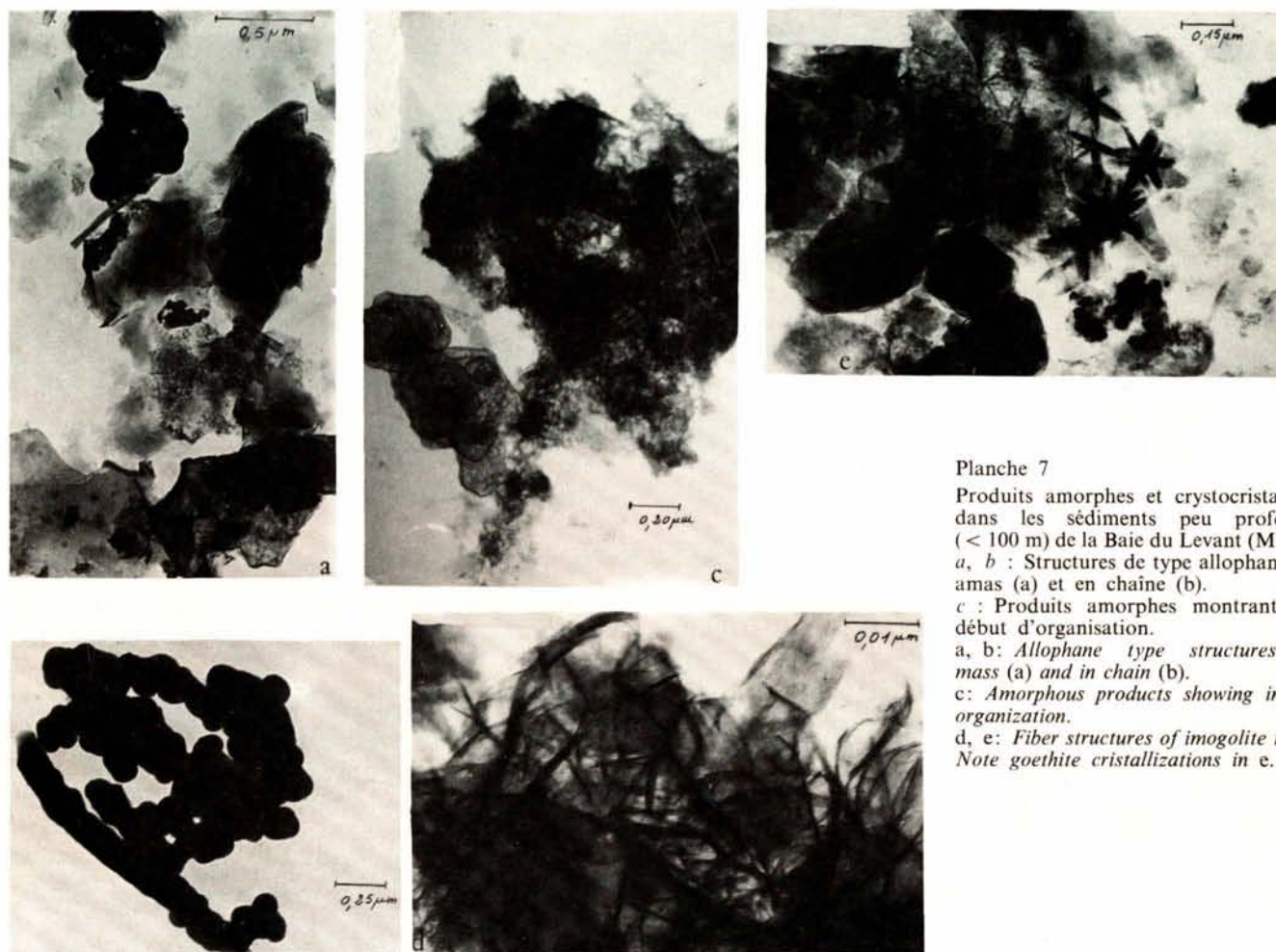


Planche 7

Produits amorphes et cryptocristallins dans les sédiments peu profonds (< 100 m) de la Baie du Levant (MET).
 a, b : Structures de type allophane en amas (a) et en chaîne (b).
 c : Produits amorphes montrant un début d'organisation.

a, b: *Allophane type structures in mass (a) and in chain (b).*
 c: *Amorphous products showing initial organization.*

d, e: *Fiber structures of imogolite type. Note goethite crystallizations in e.*

Produits cryptocristallins et amorphes

Les sédiments marins de Vulcano sont caractérisés par la présence, à tous les étages bathymétriques, d'une phase plus ou moins bien cristallisée et abondante. Ces produits sont toutefois, de nature et d'origine diverses :

- près des fumerolles sous-marines, le soufre colloïdal dérivé de l'hydrogène sulfuré est en partie utilisé par les bactéries oxydantes; il participe aux dépôts littoraux où il constitue, pratiquement, la seule phase fine;
- au débouché et autour de la source hydrothermale de Pietre Bianca située au sud de la Baie du Levant (fig. 1 b), ce sont les hydroxydes de fer amorphes qui forment la phase fine parfois abondante, des dépôts néritiques (Monaco et Valette, 1976). L'analyse chimique révèle une quantité appréciable de silicium (20 à 25 %) et d'aluminium (4 %) mêlés au fer (32,30 %), ainsi que la présence de vanadium, manganèse, baryum, lanthane, zinc et or, cations alcalins et alcalino-terreux en faibles teneurs ou en traces. Les dépôts hydrothermaux sont habituellement caractérisés par des rapports Si/Al élevés (Hoffert *et al.*, 1978). La teneur relativement élevée en Al des précipités de Pietre Bianca pourrait être due à la présence de silicates et de verres. Ces hydroxydes prennent la forme d'amas non structurés de caractère assez proche des autres dépôts

hydrothermaux littoraux (Butuzova, 1969; Puchelt, 1973) ou profonds (Arcyana, Hoffert, 1975). Seuls la goethite, l'hématite et quelques oxydes de manganèse cristallisent au sein de ces amas;

- Une catégorie importante de produits cryptocristallins consiste dans des particules fines, sans forme définie et amalgamées, essentiellement silico-ferriques. Outre ces éléments essentiels elles peuvent contenir de l'aluminium, des cations alcalins (K) et alcalino-terreux (Ca), du titane, du manganèse ou du plomb. En certaines stations ces éléments peuvent devenir prédominants. Ce type de particules est assez généralisé dans les dépôts et les suspensions de la Baie du Levant. Il nous paraît jouer un rôle important dans le transport des éléments en traces et dans la genèse des minéralisations. Les oxydes de manganèse du centre de la Baie, par exemple, semblent s'organiser à partir de tels précurseurs (pl. 5 e). Il faut rechercher leur origine dans les produits précipités à partir des venues fumerolliennes ou hydrothermales, sans négliger, toutefois, l'apport particulière issu de l'érosion continentale;
- d'autres particules proviennent plus certainement de l'altération des matériaux volcaniques. Elles sont de deux types :
 - structures globulaires en amas ou en chaînes, de l'ordre du micron. Elles résultent de la coalescence de globules de 0,1 à 0,2 μm (pl. 7 a et b) et seraient

de nature silico-alumineuse. Des produits identiques sont souvent décrits dans les produits d'altération des roches pyroclastiques (Sieffermann, Millot, 1969; Moinereau *et al.*, 1974; Singer, 1974) et ont été obtenus dans des conditions expérimentales (Trichet, 1970), — structures fibreuses du genre imogolite (Parfitt, MacHardy, 1974). Tous les termes de transition entre le verre frais et l'imogolite à aspect flexueux s'observent (pl. 7 c, d et e). Rappelons que ces structures servent de support aux cristaux d'hallowite, formés dans les sols et les altérations des roches de Vulcano (Monaco, Valette, 1978).

Ces deux catégories de particules amorphes ou crypto-cristallines constituent une part importante de la fraction fine des sédiments peu profonds de Vulcano. Nous pensons que ces particules résultent, en partie, de l'altération des roches immergées qui assure leur désilicification et leur désaluminisation (Moinereau *et al.*, 1974; Trichet, 1970). A cette action d'origine pédogénétique s'ajoute, dans la baie du Levant une évolution sous-marine des matériaux détritiques essentiellement vitreux.

Phase organique

La teneur en carbone organique des sédiments de Vulcano est, toujours inférieure à 0,30 %; les valeurs maximales sont associées aux zones à herbiers et aux vases à organismes (Valette, 1969). Une partie de ce carbone est dérivée d'éléments figurés, tel le graphite ou le graphitoïde assez fréquemment observés dans les sédiments de la baie (Valette, 1977).

En outre, deux types d'organismes peuplent les fonds de la baie : les organismes siliceux (Diatomées), fréquents dans les secteurs côtiers soumis à l'influence des manifestations hydrothermales, sont relayés à partir de 50 à 100 m de profondeur par les organismes carbonatés (Coccolithophoridés et Foraminifères). Ce gradient se manifeste clairement; dans les zones de transition les deux populations coexistent avec toutefois des états de conservation différents. Après une prolifération des Diatomées dans la zone peu profonde, les squelettes sont atteints par des phénomènes de dissolution très marqués (pl. 2 b).

DISCUSSION

Pour faire la part de l'héritage et de la néoformation dans les sédiments avoisinants l'île de Vulcano, il est

indispensable de rappeler brièvement la composition minéralogique des roches et des altérations des zones émergées proches (Vulcano), ou lointaines (Sicile).

Les roches basiques (basaltes et andésites trachytiques du Sud ou basanites à leucite de Vulcanello) contiennent de l'olivine, de l'augite, des plagioclases, des feldspaths alcalins et parfois de la biotite. Les roches acides (liparites de Lentia et trachytes calcoalcalins de la Fossa) renferment des feldspaths alcalins, des plagioclases et parfois de l'augite et de l'olivine, en enclaves. La magnétite est présente dans toutes les roches (Keller, 1967, 1970 *a* et *b*).

A Vulcano, il faut distinguer les produits de l'altération météorique de ceux de l'altération fumerolienne (Monaco, Valette, 1978). Dans les sols bruns développés sur les pentes du cratère récent de Fossa et les cendres de Vulcanello, les espèces minérales les plus fréquentes sont la smectite et l'hallowite, qu'accompagnent occasionnellement des interstratifiés, des oxydes (hématite) et des hydroxydes de fer (goethite). Les produits amorphes (allophane et imogolite) dominent souvent la phase fine des altérations. L'altération fumerolienne conduit à une destruction presque totale de la roche; seuls quelques plagioclases, pyroxènes et verres fortement corrodés subsistent à côté des minéraux de néogénèse : chlorure d'ammonium et de fer, soufre, réalgar, borates et fluorures. Dans le domaine circumlittoral (plages d'Acqua Calda et de Caminiti, Mare d'Acqua Bollente) la paragenèse s'enrichit de gypse, halite et natroalunite.

Héritage

Les minéraux

La fraction silto-sableuse

Dans les dépôts marins, verres, silicates, ferromagnésiens et magnétite de la *fraction silto-sableuse* sont hérités. Leur répartition marque les diverses provinces minéralogiques; dans la baie du Levant s'observent une zone nord à augite (35 %) et plagioclases (35 %), une zone sud à augite dominante (45 %) et une large zone centrale où augite, plagioclases et verres se mêlent à part égale (30 %). On reconnaît dans ces trois zones l'influence respective des basanites de Vulcanello, des basaltes de Vulcano ancien, et, au centre, des éjectats de la Fossa.

La fraction fine

La filiation des produits de la fraction fine (argillo-colloïdale) est également aisée à reconstituer : maté-

riaux détritiques (verres sains et altérés, feldspaths et plagioclases), produits hydrothermaux (soufre, alunite et gypse) et produits pédogénétiques (oxydes et hydroxydes de fer). Seules les argiles posent le problème de leur origine. Aux smectites, halloysites et interstratifiés qui peuvent être issus de l'altération météorique s'ajoutent, dans le domaine marin, la kaolinite et l'illite.

Le problème de la kaolinite est complexe et il faut envisager diverses hypothèses :

— on peut invoquer une altération météorique des roches anciennes de l'île, c'est-à-dire des actions pédogénétiques plus longues que celles qui ont amené la formation de l'halloysite sur les roches récentes de la Fossa. Cependant, une étude complémentaire sur une vingtaine d'échantillons récoltés dans la zone ancienne de Piano, susceptible d'alimenter la Baie du Levant, a confirmé la présence presque exclusive d'halloysite;

— on connaît la contribution des terrains pliocènes de la Sicile à la sédimentation marine quaternaire et actuelle de la Méditerranée (Chamley, 1971; Tomadin, 1974); l'illite, la kaolinite et la smectite sont très largement répandues jusque dans les bassins et les fosses siculo-tunisiennes (Chassefiere, Monaco, 1973; Blanc-Vernet *et al.*, 1975). De ce fait, il paraît vraisemblable que la Sicile puisse constituer une province d'alimentation pour les bassins péri-éoliens (Cefalu et Gioia). Les arguments en faveur d'une telle origine sont l'abondance de la kaolinite au pied de la pente de l'île et son association avec l'illite, autre phyllite absente du bassin versant de la Baie du Levant. En général, ces minéraux sont liés au faciès peu profonds.

Les agents

Plusieurs agents interviennent dans l'alimentation du domaine marin : colluvionnement, érosion fluviale et littorale, transport éolien et apports directs par les éruptions volcaniques.

Si l'on considère l'alimentation par l'édifice volcanique lui-même, c'est probablement le colluvionnement qui est l'agent principal compte tenu de la morphologie littorale. Le drainage fluviale est assuré par le « rio Grande » de façon temporaire (climat méditerranéen aride) et locale. Au sud de la baie (entre Punta Nere et Punta Lucia), il peut être à l'origine de la concentration en smectite dérivée de l'altération météorique. Il est par ailleurs évident qu'une grande partie de la couverture sédimentaire meuble sablo-silteuse provient des lapillis de la dernière éruption (1889).

L'alimentation par le vent est assurée par le Ponant (apport local) et le Sirocco (apport sicilien), ce qui expliquerait la large distribution des minéraux tels que l'illite et la kaolinite.

Les actions

En domaine marin le matériel détritique subit les actions hydrodynamiques, houles et courants, qui ont pour effet de classer les minéraux en grains en fonction de leur densité, taille et forme, d'où le gradient granulométrique et minéralogique déjà signalé et l'épuisement

vers le large des minéraux lourds et fragiles (olivine, augite), de trier les minéraux argileux (sédimentation différentielle) pour aboutir à des enrichissements locaux; ainsi la smectite et l'halloysite se concentrent dans les faciès vaseux, dès 200 m de profondeur.

Le fort gradient de pente spécifique aux plates-formes volcaniques, l'activité sismique, la faible cohésion du matériel volcano-sédimentaire facilitent les remaniements sous-marins et entraînent localement une grande hétérogénéité du matériel.

Néof ormation

Le problème des néoformations se pose pour certaines argiles et les minéraux du fer et du manganèse.

Les argiles

A Vulcano, la smectite existe à terre, dans les sols de Fossa et provient de l'altération météorique (Monaco, Valette, 1978). Donc, dans les faciès marins le minéral est en grande partie hérité et subit un tri hydrodynamique. Cependant, quelques présomptions existent en faveur d'une origine authigène :

- l'existence d'apports de silice, d'alumine et de fer dissouts ou particulaires par les émissions hydrothermales et leur débouché dans un environnement relativement à l'abri d'une circulation importante;
- la présence de particules cryptocristallines silico-ferriques et alumineuses (*cf.* paragraphe p. 84) qui permet d'envisager la possibilité de formation de nontronite. Par contre, il n'y a pas d'indice de genèse précoce de glauconite-celadonite (Hoffert *et al.*, 1978);
- l'existence de termes de transition entre le verre, la structure flexueuse de l'imogolite et les argiles à bords plissés. L'organisation de la smectite dans des conditions d'altération hydrothermale et en présence de NaCl a été constatée (Trichet, 1970). On observe, de même, une évolution dans l'espace où le matériel amorphe est substitué par des minéraux gonflants bien cristallisés. Le processus est, donc, un peu différent de l'argilisation des cendres volcaniques de Santorin signalée par Chamley (1971) où l'origine de la montmorillonite est surtout diagénétique.

Comme pour la smectite, une synthèse de la kaolinite n'est pas totalement à écarter bien que l'origine détritico-sicilienne, par les vents ou les courants, soit dominante. La présence de ce minéral dans les champs hydrothermaux et jusqu'au sein des précipités localisés dans les anfractuosités de la roche fumerollisée, sa très bonne cristallinité (pl. 2 d), l'absence de sélection granulométrique (qui devrait se produire dans le cas où seule une origine lointaine interviendrait) peuvent être cités à l'appui d'une telle hypothèse.

Les précurseurs de la kaolinitisation seraient les produits allophaniques (Eberl, Hower, 1975; Manus, 1968). Ce type de filiation paraît clair à l'observation où des particules granulaires ou globuleuses tendent vers la forme hexagonale définitive (pl. 2 c, 7 a et c). On sait la difficulté que pose cette néoformation même *in vitro*. Siffert (1962) a montré la nécessité de la pré-

sence de minéralisateurs capables de former avec l'aluminium des complexes hexacoordonnés. Ici, ce rôle pourrait être joué par le soufre et l'alunite. Il ne faut pas négliger, également, les conditions physico-chimiques au voisinage des événements fumeroliens : température de l'ordre de 60 à 100°C, pH acide (2 à 5) et libération de quantités appréciables de silice.

Les minéralisations

A la côte, les sulfures de fer sont liés à la proximité des fumerolles et aux conditions de milieu acides et réductrices qu'elles engendrent ($Eh < 100$ mV; $pH < 6$). L'évolution rapide de ces conditions dans l'espace explique que les sulfures occupent une zone restreinte (25 à 30 cm autour des événements). Rappelons qu'il s'agit d'encroûtements (melnicovite, pyrite, marcassite) qui utilisent le soufre apporté sous forme d'hydrogène sulfuré par les gaz fumeroliens. Le fer est issu en partie du lessivage des roches de l'édifice volcanique par les solutions hydrothermales ($\theta > 100^\circ\text{C}$; $pH \approx 2$; $Eh \approx -600$ mV), et en partie de la remobilisation locale de cet élément dans les minéraux supports, surtout la magnétite.

Au fur et à mesure de la dilution et de l'oxydation des solutions hydrothermales par le milieu marin, les sulfures font place au soufre ($100 < Eh < 300$ mV, $pH < 7$), puis au gypse ($Eh > 300$ mV; $pH > 7$) et à l'alunite. Seul ce dernier minéral, en fines cristallisations, parvient jusqu'aux dépôts profonds, et paraît donc être le plus stable en domaine marin ouvert. Au large, les sulfures de fer réapparaissent. Ils sont exclusivement représentés par des pyrrhosphères et des grains arrondis de pyrrhotine dispersés dans les vases bathyales et résultent alors de réactions de micromilieux (Bouysse *et al.*, 1966).

Les oxydes de fer et de manganèse sont également symptomatiques des milieux volcano-sédimentaires (Zelenov, 1963). Ces minéralisations possèdent souvent des organisations analogues : goethite et manganite authigènes, par exemple, se trouvent fréquemment en patine autour des grains de verre (silts et sables), mais aussi en particules isolées de faible dimension (granules ou baguettes) dans les sédiments pélitiques. Par contre, magnétite et hématite se trouvent exclusivement à l'état de grains dispersés dans le sédiment.

La distribution spatiale de ces diverses minéralisations est déterminée par l'évolution géochimique du milieu.

Les sulfures de fer cantonnés dans la zone littorale, sont peu à peu relayés vers le large par les oxydes; la zone de transition est marquée par de fréquentes oxydations de grains de pyrite ou de pyrrhotine en goethite.

Sans écarter totalement les phénomènes d'altération sous-marine (Michard, 1975), le fer et le manganèse ont ici pour origine essentielle la source hydrothermale et, dans une moindre mesure, les produits d'altérations issus du continent (Monaco, Valette, 1978). La source apporte en quantité du fer ($3\,000 \cdot 10^3$ ppb) et du manganèse ($20 \cdot 10^3$ ppb) à l'état dissout. Au contact de l'eau de mer, le fer précipite massivement à l'émissaire même, sous forme d'hydroxydes amorphes, tandis que le manganèse ne donne lieu à des minéralisations importantes qu'au centre de la Baie. On retrouve donc le schéma classique de « précipitation différée » de ces éléments (Bonatti *et al.*, 1972). Au contraire, les apports issus du continent sont représentés presque exclusivement par des particules (magnétite, hématite, goethite).

Les fines particules silicoalumineuses que l'on retrouve vers le large ont donc une double origine : hydrothermale et pédogénétique. Elles portent le fer et/ou le manganèse et jouent le rôle de véhicule vis-à-vis de ces éléments. Entraînées par les courants de sortie de la Baie du Levant, elles transitent vers le large à l'état plus ou moins individuel et sédimentent, en partie, dans des zones privilégiées (accidents morphologiques de la pente, replat ou fosse, zones calmes...).

De ce fait, les formes en micronodules suggèrent l'intervention de phénomènes diagénétiques; dans les sédiments, les particules isolées et les patines mixtes à fer et manganèse représenteraient des états immatures.

CONCLUSION

Les dépôts volcano-sédimentaires des zones à volcanisme tardif se définissent par la coexistence de quatre phases d'importance variable : détritique, organogène, néoformée et de précipitation. Ces quatre phases existent dans les fonds marins avoisinant l'île de Vulcano (fig. 3).

• La phase détritique d'origine insulaire ou sicilienne prédomine, puisque issue en grande partie des reliefs jeunes et des éruptions historiques de l'île.

• La phase organogène prend une nette importance dans le milieu au-delà de 40 m de profondeur. Elle est représentée surtout par des organismes calcaires. Dans le domaine plus littoral, elle s'adapte aux conditions physicochimiques particulières (θ , pH, SiO₂) créées par les venues hydrothermales : organismes siliceux et calcaires se relayent.

• La phase néoformée comprend des minéraux de néogénèse continentale (argiles et oxydes de fer des sols et altérations), des produits d'altération sous-marine (argiles possibles, produits amorphes et cryptocristallins).

• La phase de précipitation qui donne naissance à des minéralisations en sulfures, sulfates et oxydes parfois impliqués dans des phénomènes de diagenèse précoce.

L'équilibre entre ces diverses phases est régi par deux facteurs essentiels : l'un géochimique, l'autre hydrodynamique :

– le facteur géochimique, engendré par les phénomènes hydrothermaux, est à l'origine des minéralisations sulfurées (fumerolles) et oxydées (source) littorales. Les aires

restreintes qu'occupent ces minéralisations s'expliquent par les brutales variations des conditions physicochimiques du milieu (θ , pH, Eh);

– le facteur hydrodynamique, détermine le classement des différentes phases.

Le taux de sédimentation, en partie assujéti à ces deux facteurs, influe sur la diagenèse et donc sur l'état d'évolution des minéralisations.

A Vulcano, compte tenu du domaine exploré (zone péri-insulaire de 0 à 1 000 m), le faciès volcano-sédimentaire est dominé par la phase détritique. Par rapport au domaine abyssal où ce type de recherches a été mené, il est normal que les minéralisations à manganèse, notamment, s'expriment de manière plus discrète.

Remerciements

Nous tenons à remercier tout particulièrement M^{me} E. A. Perseil qui a bien voulu déterminer les minéraux du manganèse et participer à des discussions sur leur origine.

Figure 3
Modèle volcano-sédimentaire. *Volcano-sedimentary model.*

Milieu continental	Phases	Produits	Champ hydrothermal	Néritique	Bathyal	Abyssal
Vulcano	Soluble					
	Fe, Mn					
Roche saine	Roche altérée Météor. Fumer.	Sulfures Pyrite Marcassite Melnikovite				
		Sulfates Gypse Alunite				
Verre, silicates, oxydes Fer (ma) Érosion, éjectas Produits amorphes, oxydes fer, argiles Allophane, imogolite, hémattite, smectite, halloysite Produits amorphes, sublimés Alunite, S, gypse	Précipitation	Oxy-hydroxydes Fer Goethite Hématite Amorphe				
		Mn Manganite Birnessite Thodorokite				
	Néoformation	Argiles Kaolinite (?) Smectite (?) Produits amorphes Produits cryptocristallins Verres				
Sicile Argiles Smectite Kaolinite Illite Détritique	Détritique	Ferromagnésiens Feldspaths plagioclases Oxydes fer Argiles Halloysite Smectite				
	Organogène	Diatomées Coccolithes				
				Fixation éléments traces		

Les travaux de recherches ont été menés avec le concours des services de microscopie électronique et de microsonde du Brgm (Orléans).

MM. les Professeurs Bolognari et Cavallaro ont mis à notre disposition les moyens logistiques nécessaires au travail de terrain. Nous les en remercions vivement.

RÉFÉRENCES

- Arcyana, Hoffert M.**, 1975. Premières observations directes de sources hydrothermales en domaine océanique et nature des dépôts hydrothermaux de la faille transformante A-Famous 74, 3^e Réunion Ann. Sci. Terre, Montpellier, p. 398.
- Bergeat A.**, 1899. Die Aolischen Inseln. Abh. Akad. Wissensch, Munchen, math. phys. Kl., XX, 192-202.
- Beutelspacher H., Van der Marel H. W.**, 1968. *Atlas of Electron Microscopy of Clay Minerals and their Admixtures*, Elsevier N. Y., 333 p.
- Biscaye P. E.**, 1965. Mineralogy and sedimentation of recent Deep-sea clay in the Atlantic Ocean and Adjacent seas and Oceans, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 803-832.
- Blanc-Vernet, L., Chamley H., Frojet C., Le Boulicaut D., Monaco A., Robert C.**, 1975. Observations sur la sédimentation marine récente dans la région siculo-tunisienne, *Univ. Provence, Géol. Méditerran.*, II, 1, 31-48.
- Bonatti E.**, 1965. Palagonits, hyaloclastites and alterations of volcanic glass in the ocean, *Inter. volc. Ass., Bull.*, 23, 1-22.
- Bonatti E., Kraemer T., Rydell H.**, 1972. Classification and genesis of submarine iron manganese deposits, in *Ferromanganese deposits on the ocean floor*, edited by D. Horn, National Science Foundation, Washington DC, 149-166.
- Böstrom K.**, 1970. Submarine volcanism as a source for iron, *Earth Planet Sci. Lett.*, 9, p. 348.
- Böstrom K., Peterson M. N. A.**, 1966. Precipitates from hydrothermal exhalations on the East Pacific Rise, *Econ. Geol.*, 61, 1258.
- Bouysse Ph., Goni J., Parent Ch., Le Calvez Y.**, 1966. Recherches du Brgm sur le plateau continental. Premiers résultats sédimentologiques, micropaléontologiques et géochimiques (Baie de la Vilaine), *Bull. Brgm*, 5, 1-77.
- Butuzova G. J.**, 1969. Processus actuels de formation de minerai de fer volcano-sédimentaire dans la caldeira de Santorin (Mer Egée) et son influence sur la géochimie des sédiments, *Tr. Géol. Inst. Akad. Nauk. Sssr*, 194, 1-114.
- Chamley H.**, 1971. Recherches sur la sédimentation argileuse en Méditerranée, *Sci. Geol. Mem., Strasbourg*, 35, 225 p.
- Chassefiere B., Monaco A.**, 1973. Relations entre sédimentogénèse, propriétés mécaniques et minéralogiques. Application au détroit siculo-tunisien, *C. R. Acad. Sci. Paris*, 227, 141-144.
- Chester R.**, 1965. Elemental geochemistry of Marine sediments, in *Chemical Oceanography*, vol. 2, edited by J. P. Riley and G. Skirrow, Academic Press, London, 23-80.
- Eberl J., Hower J.**, 1975. Kaolinite synthesis: the role of the Si/Al and (alkali) (H⁺) ratio in hydrothermal systems, *Clays Clay Miner.*, 23, 301-309.
- Elskens I., Tazieff H., Tonani F.**, 1969. Investigations nouvelles sur les gaz volcaniques, *Bull. volcanol.*, XXXII, 523-574.
- Elskens I., Tonani F.**, 1969. Geochimica dei gas vulcanici per fini di previsione dell' attività Vulcanica esplosiva, *Contratto Cnrs* 69-00544-115, 3316-3322.
- El Wakeel S. K., Riley J. P.**, 1961. Chemical and mineralogical studies of deep-sea sediments, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 25, 110-146.
- Hoffert M., Perseil A., Hekinian R., Choukroune P., Needham H. D., Francheteau J., Le Pichon X.**, 1978. Hydrothermal deposits sampled by diving saucer in transform fault "A" near 37°N on the Mid-Atlantic Ridge, Famous Area, *Oceanol. Acta*, 1, 1, 73-86.
- Honnorez J.**, 1967. La palagonitisation, thèse Fac. Sc. Bruxelles, 227 p.
- Honnorez J.**, 1969. La formation actuelle d'un gisement sous-marin de sulfures fumeroliens à Vulcano (Mer Tyrrhénienne), *Miner. Deposita*, 4, 2, 114-131.
- Honnorez J., Honnorez-Guerstein B., Valette J. N., Wauschkuhnaa.**, 1973. Present day formation of an exhalatff sulphide deposit at Vulcano (Tyrrhenian Sea). Part II: Active cristallization of fumarolic sulphide in the volcanic sediments of the Baia di Levante, *Ores sediment*, 139-166.
- Keller J.**, 1967. Alter und Abfolge der Vulkanischen Ereignisse auf den Aolischen Inseln, Sizilien. *Ber. Naturforsch. Ges. Freiburg im Breisgau*, 57, 33-67.
- Keller J.**, 1970 a. Die historischen Eruptionen von Vulcano und Lipari (Deutungen alter Benichte aufgrund neuer geologischer Befunde), (Trad. Brgm 1973), *Z. Dtsch. Geol. Ges.*, 121, 150-155.
- Keller J.**, 1970 b. Studio Geovulcanologico delle isole di Salina e Vulcano, *Technical rep., Ist. Int. Vulc. CNR, Catania*, p. 85.
- Le Guern F.**, 1972. Études dynamiques sur la phase gazeuse éruptive, *SI*, 1-190.
- Manus R.**, 1968. Experimental chemical weathering of two alkali-feldspaths, Univ. Cincinnati, Ph. D, Mineralogy, 100 p.
- Michard G.**, 1975. L'action de l'eau de mer sur les basaltes, source possible de manganèse. Étude thermodynamique préliminaire, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. D*, 280, 1213-1216.
- Moinereau J., Bibent, B. Trichet J.**, 1974. Présence de produits amorphes et de minéraux argileux de la famille de l'halloysite en suspension dans les eaux de drainage d'un tuf basaltique, *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. D*, 278, 2389-2392.
- Monaco A., Valette J. N.**, 1976. Présence de micronodules de manganèse dans les sédiments marins récents de Vulcano (Iles Éoliennes, Italie). Résultats préliminaires, *C. R. Acad. Sci., Paris, Sér. D*, 282, 2135-2138.
- Monaco A., Valette J. N.**, 1978. Étude des produits d'altération fumerolienne et météorique à Vulcano (Iles Éoliennes, Italie), *Clay Miner.* 13, 1, 13-00.
- Parfitt R. L., Mac Hardy W. J.**, 1974. Imogolite from New-Guinea. *Clays Clay Miner.*, 22, 369-371.
- Perseil E. A., Pinet M.**, 1977. Caractères essentiels et paragenèses des : vernadites, birnessites, rancites et todorokites dans les grands gisements et les concentrations sous-marines, 5^e Réunion. *Ann. Sci. Terre, Rennes*, p. 371.
- Perseil E. A., Leclaire L.**, 1977. Structure, minéralogie et conditions de formation des nodules polymétalliques dans les bassins de Crozet et de Madagascar, Recherches océanographiques dans l'océan Indien Austral, Paris, juin 1977.
- Pichler H.**, 1970. Volcanism in Eastern Sicily and the Aolian Islands, in *Geol. hist. Sicily, Tripoli, Pet. explor. Soc. Libya*, 261-284.
- Picot P., Ragot J. P.**, 1973. Étude de la détérioration en surface des matériaux du temple de Borobudur (Indonésie), 1^{er} Colloque Intern., 77-88.
- Puchelt H.**, 1973. Recent iron sediment formation at the Kameni islands, Santorini (Greece), in *Ores in sediments, Int. Un. of Geol. Sci., Ser. A*, 3, 227-245.
- Siefferman G., Millot G.**, 1969. Equatorial and tropical weathering of recent basalts from Cameroon: allophanes, halloysite, meta-halloysite, kaolinite and gibbsite, *Proc. Inter. Clay Conf. 1969, Tokyo*, 1, Israël Univ. Press, Jérusalem, 417-430.
- Siffert B.**, 1962. Quelques réactions de la silice en solution : la formation des argiles, *Mem. Serv. Carte Géol. Alsace-Lorraine*, 21, 86 p.
- Singer A.**, 1974. Mineralogy of palagonitic material from the Golan Heights, Israël, *Clays Clay Miner.*, 22, 231-240.
- Tazieff H.**, 1970. New investigation of eruptive gases, *Bull. Volc.*, 34, p. 2.
- Tazieff H., Le Guern F., Carbonelle J., Zettwoog P.**, 1972. Étude chimique des fluctuations des gaz éruptifs du volcan Erta Ale (Afar, Éthiopie), *C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. D*, 274, 1003-1006.
- Tomadin L.**, 1974. Les minéraux argileux dans les sédiments actuels de la mer tyrrhénienne, *Bull. Groupe fr. Argiles*, 26, 2, 219-229.
- Treuil M., Varet J.**, 1973. Critères volcanologiques, pétrologiques et géochimiques de la genèse et de la différenciation des magmas basaltiques : exemple de l'Afar, *Bull. Soc. Géol., Fr. ser. 7*, 15, 401-444.
- Trichet J.**, 1970. Contribution à l'étude de l'altération expérimentale des verres volcaniques, *Trav. lab. Géol. Ec. Norm. Super., Paris*, 192 p.
- Zelenov K. K.**, 1963. Underwater volcanism and its role in the formation of sediments, *Tr. Géol. Inst. Akad. Nauk SSSR*, 81.