

LES SOURCES THERMALES SULFUREUSES DE L'ANSE D'ARNETTE (W DU CAP COURONNE, BOUCHES-DU-RHONE). PREMIÈRES OBSERVATIONS

Claude FROGET

La morphologie générale du littoral de la chafne de la Nerthe ayant fait l'objet d'une précédente publication [1], j'ai été amené à reprendre en détail l'étude du secteur compris entre Carro et l'anse de Bonnieu, à la suite de la découverte d'exurgences d'eaux thermales sulfureuses dans l'anse d'Arnette. Ces eaux permettent notamment d'expliquer la formation des dépôts gréseux et pyriteux que l'on observe dans les cassures et anfractuosités du littoral. Elles sont, en outre, responsables de dépôts de soufre sous-marins, d'un caractère particulier.

A - LE CADRE GEOLOGIQUE (fig.1)

Tout le secteur considéré est constitué par la mollasse calcaire blanche du Burdigalien supérieur ; au-dessous se trouve une couche d'argile sableuse du même étage, bien visible dans l'anse du Verdon, et que j'ai retrouvée dans une grotte sous-marine proche de la crique d'Arnette, à une profondeur d'environ -10 m. Ce niveau sera particulièrement important dans la suite de cet exposé ; il compte 72 % d'éléments fins ($<50\mu$), et 28 % d'éléments grossiers ($>50\mu$). Ces derniers comprennent du quartz et de la muscovite en quantité dominante, des minéraux lourds transparents et des grains de pyrite altérés en limonite ; chauffés, ces grains, qui présentent les formes cristallines de la pyrite, se transforment en Fe_2O_3 rouge. La fraction grossière peut s'agglomérer et former alors dans la roche des nodules de 1 à 2 cm de diamètre, très pyriteux. Cette roche argileuse forme une couche imperméable dans l'ensemble, mais sa teneur élevée en éléments grossiers la rend apte à se dissocier dans l'eau au bout d'un certain temps.

A l'Est d'Arnette, dans l'anse du Verdon, la mollasse recouvre un anticlinal faillé à noyau urgonien et à enveloppe aptienne. Le faciès urgonien occupe la partie médiane du vallon ; les calcaires blancs qui le constituent sont massifs et durs, offrant à la mollasse une assise solide. Plus au Sud, l'Aptien est calcaréo-marneux, puis franchement marneux ; les bancs, à très fort pendage vers le Sud, ont une direction sensiblement E-W ; il est probable qu'ils se poursuivent vers l'W sous la mollasse. Les marnes sont très riches en nodules de pyrite, altérés en limonite à l'affleurement, mais cependant bien reconnaissables à leurs formes. Les fossiles (Ammonites surtout), sont également épigénisés en pyrite.

Au Nord, la dalle miocène est limitée par le vallon de Bonnieu, d'orientation E-W, où affleure le Néocomien parcouru par des accidents de même orientation. Le vallon s'est creusé à la faveur de ces accidents, et l'anse de Bonnieu correspond à l'envahissement de ce thalweg par la mer. Le secteur considéré comprend donc un quadrilatère de calcaire mollassique, entouré par des terrains calcaréo-marneux ou marneux (Hauterivien, Aptien), et recouvrant un niveau argilo-sableux.

La carte géologique sommaire des environs de l'anse d'Arnette (fig.1), utilise les résultats d'un travail en cours.

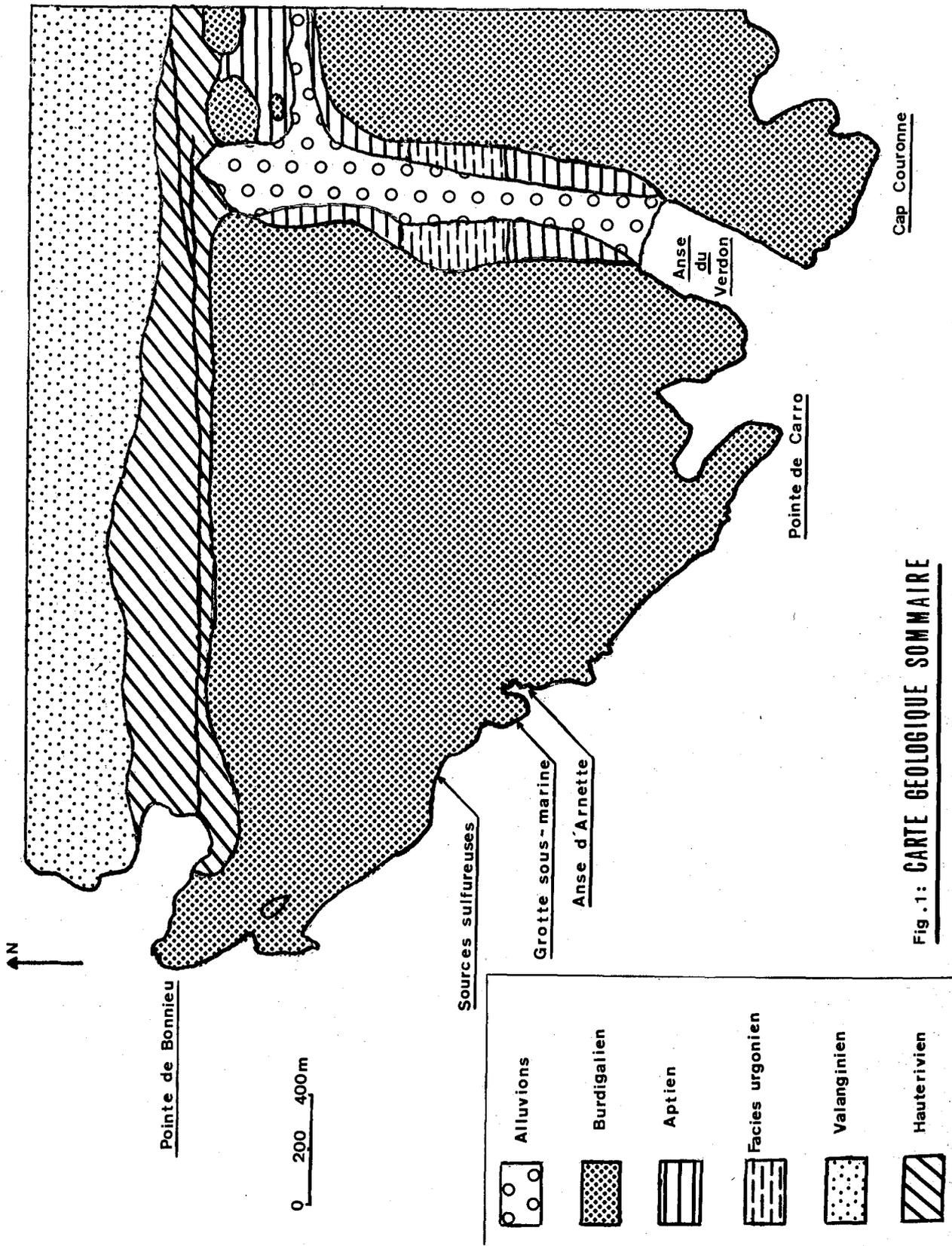


Fig. 1: CARTE GEOLOGIQUE SOMMAIRE

B - LA MORPHOLOGIE DU LITTORAL

1/ De Carro à l'anse d'Arnette : la côte est basse, le plateau calcaire de l'arrière-pays se poursuit loin en mer, avec une faible pente constituant les écueils nommés "ragues d'Arnette". Le sommet de la plate-forme littorale est occupé par un cordon de galets qui marque très régulièrement le niveau des fortes mers. La plate-forme sous-marine forme un glacis monotone, suivant le faible pendage des couches miocènes vers le Sud. Protégée par une dense couverture végétale, elle n'est pratiquement pas érodée par la mer, mises à part les actions biologiques.

2/ A partir de l'anse d'Arnette (fig.2), la côte s'élève, tandis qu'apparaissent de nombreuses cassures dans la mollasse. Il y a alors formation d'une falaise dont l'altitude augmente de plus en plus vers l'Ouest : 1m à Arnette, 3-4 m entre Arnette et la pointe de Bonnieu, où elle s'abaisse de nouveau. L'observation en plongée montre qu'en avant de la falaise se trouve toujours une plate-forme rocheuse. Disloquée en énormes blocs par les fractures largement agrandies par la mer, elle s'avance moins loin en mer qu'au voisinage de Carro. Les fractures, dont le tracé est parfois très sinueux, ne semblent point dues à des efforts tectoniques mais à une faiblesse du soubassement plastique, instable, de la mollasse. Sur le littoral, le niveau argilo-sableux situé sous la mollasse a été dégagé par la mer, par endroits totalement, ailleurs partiellement comme dans la grotte sous-marine où il a été trouvé. Cela a provoqué l'effondrement sur place des blocs de mollasse, constituant le paysage sous-marin, et, par contre-coup, la formation des fractures plus à l'intérieur.

La partie de la falaise battue par la mer montre les formes de dissolution habituelles : rainures d'abrasion et lapiaz littoraux. A une vingtaine de mètres du niveau de la mer, par temps calme, on observe un amoncellement de blocs de grandes dimensions : certains mesurent plusieurs m³ et pèsent plusieurs tonnes. Cette "levée de blocs", homologue du cordon littoral de galets, correspond au niveau des très fortes mers : les vagues, balayant la plate-forme littorale, ont ramené vers l'arrière les blocs arrachés à celle-ci. Il est d'ailleurs possible que la levée ait été construite par un niveau légèrement supérieur au niveau actuel (1-2 m) : une maigre végétation occupe, devant les blocs, un espace de quelques mètres ; elle ne pourrait vivre si elle était régulièrement balayée par les vagues.

L'espace libre entre le niveau de l'eau et la levée de blocs est occupé par un très beau système de mares de dissolution.

3/ Le modelé karstique. L'arrière-pays montre des formes karstiques indéniables : c'est un grand lapiaz parsemé de petits puits de dissolution étroits et peu profonds. La dépression fermée de la pointe de Bonnieu, souvent remplie d'eau saumâtre, semble bien être une doline. Il en est de même pour la crique d'Arnette dont les formes ne peuvent guère s'expliquer que par l'invasion d'une dépression karstique par la mer.

Enfin, la mollasse est creusée de tout un réseau de galeries karstiques : de nombreux départs de galeries sont visibles en plongée, au voisinage de l'anse d'Arnette, précisément aux points d'émergences des eaux sulfureuses. Ces galeries sont malheureusement trop étroites pour être explorées sans danger. Elles se situent en moyenne entre -5 et -10 m. Légèrement à l'W de l'anse d'Arnette, un très beau réseau de galeries est observable. Il comprend une dizaine de conduits accessibles ; les uns sont creusés dans la masse de la mollasse, les autres débouchent dans une sorte de salle à plafond très bas due à l'érosion du niveau argilo-sableux par la mer. De nombreuses plongées seront nécessaires pour étudier en détail ce réseau ; les premières observations permettent de penser que la karstification se limite à une épaisseur de 10 à 12 m de calcaire mollassique, les eaux s'écoulant au contact du niveau argilo-sableux inférieur en suivant le pendage vers la mer.

C - LES EXURGENCES SULFUREUSES

1/ Situation

En parvenant à proximité de l'anse d'Arnette, l'odeur caractéristique de l'hydrogène sulfuré révèle la présence des eaux chargées de ce gaz. Ces exurgences de type karstique ont lieu soit à

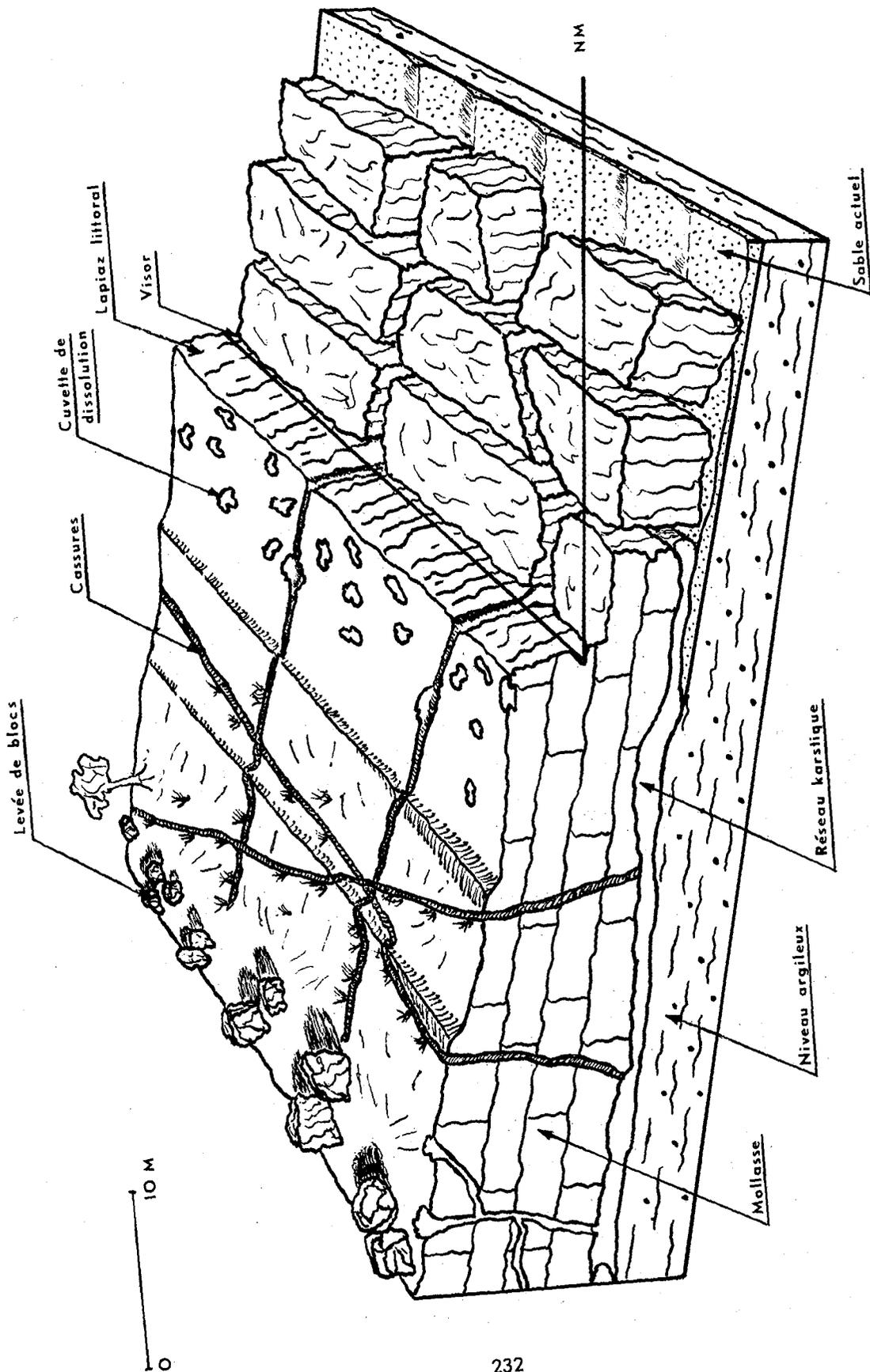
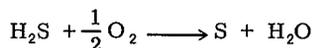


FIG.2 SCHEMA MORPHOLOGIQUE

la limite terre-mer, soit en mer. En effet, au fond de l'anse d'Arnette, l'eau sort sous pression, crevant une mince couche de sable ; ce type d'exurgence est cependant temporaire ; elle fonctionnait au début du printemps 1964, après une période de forte pluie, mais se trouvait tarie après environ deux semaines de pluviosité nulle. Les venues d'eau en mer sont beaucoup plus importantes ; on peut en observer une à l'entrée de l'anse d'Arnette et à environ 20 mètres de la côte ; par temps calme, on aperçoit très bien le bouillonnement des eaux sulfureuses arrivant à la surface. Enfin, au NW d'Arnette, d'autres exurgences sont visibles sur environ 100 m.

Ces eaux se signalent non seulement par leur odeur, mais aussi par le fait que les Algues qui vivent à leur contact sur la roche sont recouvertes d'un enduit blanchâtre. De plus, certaines sources sont chargées de flocons de soufre colloïdal ; en effet, H_2S n'est pas oxydable par l'air sec à la température ambiante, mais régénère facilement le S en présence d'eau, suivant la réaction :



Aussi, en milieu marin, la solution d' H_2S s'altère-t-elle rapidement en donnant une solution colloïdale de S. Le même phénomène a été observé près du volcan de Santorin, au cours d'une récente campagne de la Station Marine d'Endoume, à bord du navire océanographique "Calypso" en Grèce.

Enfin, il faut signaler que la plupart des sources sont tarées en été. Seule l'une d'entre elles semble fonctionner de façon continue, son débit demeurant cependant beaucoup plus faible.

2/ Caractéristiques

L'analyse chimique complète des eaux n'étant pas encore effectuée, je me bornerai à indiquer qu'elles contiennent de l'hydrogène sulfuré (H_2S), et du fer en solution comme en témoignent les minéralisations.

La température, mesurée à l'émergence, varie de 30 à 35°C, suivant le mélange plus ou moins grand avec l'eau de mer. Toutefois, cela n'est valable que lorsque les sources fonctionnent à plein débit, après une période pluvieuse. En effet, l'eau de l'unique exurgence estivale a, pendant cette période, une température voisine de 20°C.

La température maximale de 35°C, notablement plus élevée que celle de l'eau de mer, peut recevoir a priori deux explications :

- Elévation de température due au degré géothermique. Dans ce cas, les eaux proviendraient d'une profondeur d'environ 500 m.

- Elévation de température due à des réactions chimiques exothermiques au cours desquelles l'eau s'enrichirait en H_2S et en Fe.

Etant donnée la nature karstique des écoulements, la deuxième explication semblerait préférable ; de plus, on voit mal comment les eaux provenant d'une grande profondeur parviendraient à franchir le niveau argilo-sableux imperméable.

3/ Origine du soufre

Il est donc légitime de penser que les eaux sulfureuses proviennent directement des eaux de précipitations. L'enrichissement en H_2S et Fe se ferait alors au cours de leur trajet souterrain, qu'il serait possible de préciser en découvrant les points d'infiltration et en y déposant des colorants.

Quant à l'origine du soufre contenu dans les eaux, elle peut résider dans l'attaque de la pyrite renfermée dans le niveau argilo-sableux, ainsi que dans les marnes aptiennes qui affleurent à proximité, et se retrouvent peut-être en profondeur. Cette attaque expliquerait également la présence du fer.

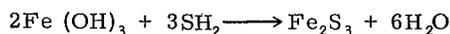
4/ Influence des eaux sulfureuses

- *Pollution des eaux littorales.* Les eaux sulfureuses étant chaudes et peu salées se stratifient à la surface de la mer. Elles sont de ce fait d'autant plus facilement entraînées vers l'E par la dérive due aux vents d'W et de NW (mistral) ; cela explique, malgré la faible importance des eaux sulfureuses relativement à l'eau marine, qu'on trouve des peuplements d'Algues d'eaux polluées (Entéromorphes, Ulves), depuis Arnette jusqu'à Carro. On peut noter, en passant, que

ceci confirme les études récentes de Roger MOLINIER montrant que les algues marines prétendues "nitrophiles sont, en fait, "thiophiles".

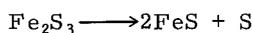
- *Influence sur la mollasse*. Au voisinage immédiat des exurgences, la structure de la mollasse est profondément modifiée. Des dépôts noirâtres et blancs s'insinuent dans la roche, naturellement poreuse. Seuls les débris de tests permettent d'identifier la roche. Une analyse chimique sommaire a permis de déceler la présence de sulfates parmi les produits blancs : il est probable que l'action des sources tend à transformer le carbonate de calcium de la mollasse en sulfate de calcium.

- *Dépôts sous-marins de soufre*. On trouve sur la grève des fragments de métal rouillé qui dégagent une forte odeur de soufre lorsqu'on les grille. Ayant prélevé en plongée des échantillons d'épaves métalliques, j'ai constaté qu'ils présentaient le même phénomène. Le dépôt du soufre sur les épaves métalliques peut s'expliquer par les réactions qui permettent la récupération du soufre, à l'état de H_2S , de certains gaz industriels (2). On a en effet :

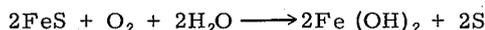


$Fe(OH)_3$ étant l'oxyde de fer hydraté, c'est-à-dire le constituant principal de la "rouille".

Une partie du soufre est libérée spontanément par la décomposition du sulfure Fe_2S_3 :



Le reste l'est par oxydation :



Cette oxydation régénère en même temps l'oxyde de fer, en sorte qu'une masse donnée peut se charger de 45 à 60 % de son poids de soufre. Certains échantillons sont recouverts d'une croûte ferrugino-sulfureuse de plusieurs millimètres d'épaisseur, englobant parfois des fragments de bois et des débris de tests, notamment des piquants d'Oursins. Cet enrichissement en soufre se produit également au voisinage du volcan de Santorin. Au cours d'une récente campagne du navire océanographique "Calypso" en Grèce, les plongées à bord de la soucoupe plongeante ont permis d'observer des sources sulfo-ferrugineuses, à une profondeur de 150 m environ. Les croûtes ferrugineuses naturelles ramenées par la soucoupe contiennent du soufre, comme les épaves métalliques de l'anse d'Arnette. Les sédiments de Santorin feront l'objet d'une publication ultérieure.

- *Dépôts dans les fractures*. Dans les cassures et les anfractuosités du lapiaz compris entre la mer et la "levée de blocs", on observe des dépôts gréseux très consolidés. Ces grès sont particulièrement bien développés dans les fractures parallèles à la côte, où ils forment des sortes de filons d'une épaisseur maximum de 10 cm, et au voisinage des sources sulfureuses. De couleur rose, ils sont fins et très isométriques. Ils comprennent du quartz, de la muscovite, de la biotite chloritisée et de la pyrite très bien cristallisée en petits cubes et octaèdres très altérés. On y trouve parfois des fragments de tests de Balanes et de *Chlamys*, probablement issus de l'érosion de la mollasse, car ces animaux appartiennent à des espèces inconnues sur nos côtes à l'époque actuelle. Le ciment du grès est de la calcite colorée en rose par des oxydes de fer.

Ce dépôt, de toutes façons post-Miocène, puisqu'on le trouve en remplissage des cavités de la mollasse, est probablement actuel ou sub-actuel. Le matériel est très voisin de la fraction grossière du niveau argilo-sableux sur lequel repose la mollasse, alors que le sable littoral actuel est presque exclusivement bio-détritique. On peut penser que des fragments du niveau argilo-sableux amenés par les vagues lors des tempêtes, accumulés dans les fractures et délavés, seraient recimentés au moment de l'évaporation de l'eau. Cela est confirmé par les fissures colmatées de la côte calcaire de Marseilleveyre. A Arnette, il y aurait dépôt de la calcite provenant de la dissolution de la mollasse par la mer, constituant le ciment, et cristallisation de la pyrite dont les éléments, Fe et S, sont contenus dans les eaux sulfureuses.

Enfin, on trouve de la pyrite non seulement dans les grès, mais aussi dans les fissures microscopiques de la mollasse, toujours au voisinage des sources sulfureuses. Il ne semble pas que ces minéralisations importantes soient contemporaines du dépôt de la mollasse ; je les rattacherai plutôt à l'influence des sources, sans pouvoir préciser encore le mécanisme de leur formation. En effet cette pyrite qui, là encore, est complètement transformée en oxydes de fer tout en gardant ses

formes cristallines, imprègne littéralement la roche, surtout dans l'étage supra-littoral battu par les embruns et soumis à l'évaporation. La minéralisation diminue progressivement en allant vers le médio-littoral pour disparaître complètement sous le visor, c'est-à-dire à l'endroit où la roche est continuellement baignée par la mer. Il se passe le même phénomène en sens inverse : atténuation des imprégnations en s'éloignant de la mer, disparition quasi complète lorsqu'on atteint la levée de blocs, et cela à l'intérieur d'un même banc de mollasse. La minéralisation est donc limitée à la zone d'évaporation actuelle.

En section polie, on voit que la pyrite occupe les fissures de la roche où elle a cristallisé en compagnie de calcite ; il y a même parfois des lits alternés de calcite et de pyrite, de 1 à 2 mm d'épaisseur ; si l'on admet que ces dépôts se font par évaporation, la calcite correspondrait aux périodes estivales où les sources ne fonctionnent pas, et la pyrite aux périodes hivernales. Des observations échelonnées sur plusieurs années devraient permettre de préciser ce point. Signalons enfin qu'il a été trouvé dans un échantillon de pyrite des fragments de petits Gastéropodes actuels, probablement *Melaraphe neritoïdes*.

Les environs de l'anse d'Arnette constituent donc un secteur intéressant, où nous assistons à une sorte de cycle ; les eaux de pluie s'infiltrent et cheminent dans la mollasse en se chargeant de soufre provenant sans doute de pyrite. En mer, le soufre précipite, en partie, sous forme colloïdale et, en partie, se dépose sur les épaves métalliques tandis que les eaux circulant dans les fissures restituent la pyrite qui s'oxyde immédiatement à l'air. Ce premier schéma explicatif est provisoire ; des observations et analyses ultérieures permettront sans doute d'y apporter des précisions.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] C. FROGET - La morphologie et les mécanismes d'érosion du littoral rocheux de la Provence occidentale. *Rec. Trav. St. Mar. End. Bull.* 30 Fasc. 45 1963.
- [2] F. ALLAIS - Chimie minérale théorique et expérimentale (Chimie électronique). Masson et C^{ie}, éditeurs, Paris 1957.