Zeitschrift: Schweizerische mineralogische und petrographische Mitteilungen = Bulletin suisse de minéralogie et pétrographie

Band: 60 (1980)

Heft: 1

Artikel: Les minéralisations de plomb, zinc et cuivre de Kadikalesi (Presqu'île de Bodrum - Turquie)

Autor: Piskin, Özkan / Bertrand, Jean

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-46657

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Schweiz. mineral. petrogr. Mitt. 60, 45–68, 1980

Les minéralisations de plomb, zinc et cuivre de Kadıkalesi (Presqu'île de Bodrum - Turquie)

par *Özkan Piskin* [1] et *Jean Bertrand* [2]

Abstract

The Pb-Zn-Cu mineralization of Kadıkalesi occurs in the Bodrum peninsula in SW Turkey, at the western end of the Taurides. This mineralization belongs either to the Taurus mineralized belt or to the younger mineralization of the Aegean province. The geology of the mineralized zone is described and the mineralization observed classed according to its mode of occurrence. Each type thus defined is studied and the paragenetic relationships among the different mineral phases are determined. Pyrite, sphalerite, tetrahedrite-tennantite, galena, bournonite, are the main primary minerals with chalcopyrite and hematite occurring as accessories, and boulangerite being quite rare. Covellite, pyrolusite, malachite-azurite and iron hydroxides are of secondary origin.

In addition to the microscope studies, the reflectivity and microhardness have been determined on the primary phases, the compositions of which have either been verified or determined by microprobe.

On the basis of the data obtained, it is thought that this hydrothermal mineralization, which is limited to calcareous and volcanic rocks, were formed in mesothermic conditions. The genesis, age relationships and magmatic setting of this mineralization suggest that it belongs to the Miocene Aegean metallogenic province.

INTRODUCTION

Les minéralisations Pb-Zn-Cu de Kadıkalesi sont localisées dans la presqu'île de Bodrum, au SW de la Turquie (Fig. 1), à l'extrémité occidentale des Taurides. Dans sa partie lycienne, cet ensemble tectonique apparaît le plus souvent constitué de nappes (de GRACIANSKY, 1972). La même structure se prolonge jusque dans les îles égéennes (BERNOULLI et al., 1974). De Keban, à l'est, jusqu'à Alanya, à l'ouest, l'unité taurique délimite une ceinture minéralisée

[1]) Faculté des Sciences de la Terre, Université d'Egée, Bornova-Izmir, Turquie.

[2]) Département de Minéralogie, Université de Genève, 13, rue des Maraîchers, CH-1211 Genève 4, Suisse.

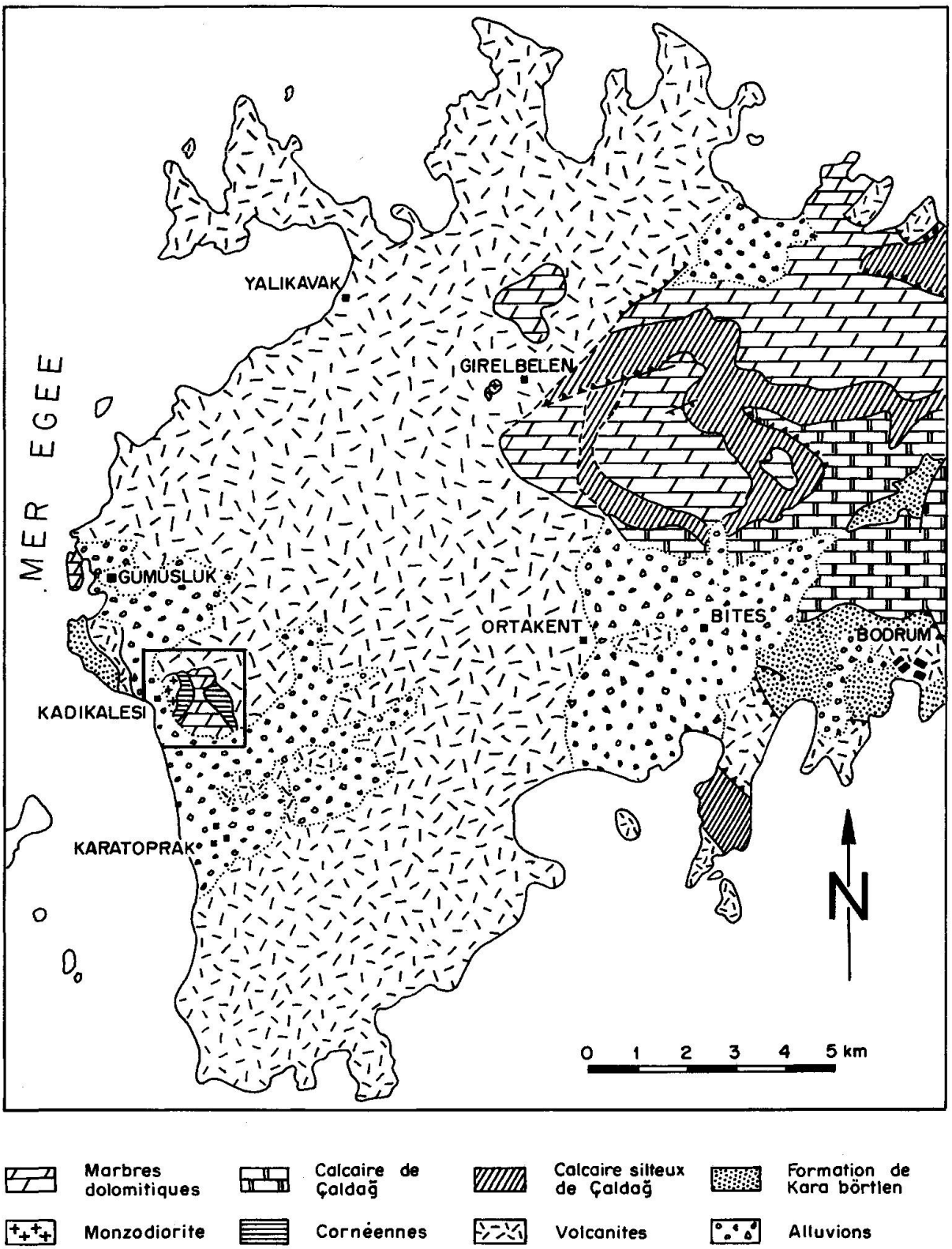

Fig. 1 Carte géologique de la péninsule de Bodrum (compilation d'après: Carte géologique de la Turquie au 1/500000, Bernoulli ‹1974›, Özçicek et Özçicek ‹1977›).

plombo-cuprifère (GÜMÜS, 1970; ASLANER, 1977). Les minéralisations faisant l'objet de ce travail se situent donc à l'extrémité occidentale de cette ceinture.

Par ailleurs, en Anatolie occidentale ainsi que dans les îles de la mer Egée, on observe de nombreuses minéralisations liées à l'importante activité magmatique miocène de caractère alcalin et calco-alcalin.

Il nous a donc paru intéressant d'étudier les minéralisations de Kadıkalesi pour tenter de préciser leur appartenance, soit à la ceinture taurique, soit à la Province égéenne, à l'une ou l'autre desquelles elles sont susceptibles de se rattacher.

Après avoir été exploitées, avant tout pour leur teneur en plomb, dès le début de ce siècle, les minéralisations de Kadıkalesi ont été abandonnées au cours de la première guerre mondiale. Depuis lors, elles n'ont plus fait l'objet que de quelques travaux de prospection.

CONTEXTE GEOLOGIQUE DES MINERALISATIONS

Les minéralisations de Kadıkalesi sont associées à trois types principaux de roches.

A. Les formations sédimentaires

Elles sont constituées: - de *marbres dolomitiques*, probablement d'âge liasique (BERNOULLI et al., 1974), souvent traversés par des dykes de roches volcaniques; - d'une succession de *conglomérats*, de grès et de *silts*, d'âge turonien (PISKIN, 1979); par endroits, les parties gréseuses et argileuses de ces formations sédimentaires sont transformées en cornéennes sous l'influence d'une intrusion monzodioritique.

B. Les roches magmatiques

Elles sont de deux types:

1. Les *monzodiorites* qui constituent un stock elliptique de 1 km. de grand axe.
2. Les *roches volcaniques*. Les études pétrographiques et pétrochimiques des roches intrusives (PISKIN, 1979) ont mis en évidence leur caractère calco-alcalin. Un tel caractère se retrouve dans les volcanites qui couvrent une grande superficie de la région étudiée. Au voisinage des minéralisations, les roches volcaniques rencontrées sont des latites-andésites, des latites, des trachytes et des rhyolites.

Des déterminations d'âges radiométriques K-Ar ont été effectuées sur ces roches magmatiques (PISKIN, 1979), donnant 11,2 ± 1,6 m.a. pour les monzodiorites et 9,5 ± 1,0 m.a. pour les volcanites.

C. Les cornéennes

Formées sous l'effet de l'intrusion monzodioritique, ces roches dérivent des parties clastiques de la série sédimentaire mentionnée ci-dessus. Il est possible de distinguer des cornéennes à diopside, à diopside et quartz, à hornblende, épidote et quartz et à chlorite, quartz et épidote.

Au point de vue tectonique, cette région minéralisée se caractérise par une structure cassante, en horsts et grabens, dominante (Fig. 2a). L'altération superficielle d'une part, mais surtout les altérations hydrothermales liées aux stades magmatique et post-magmatiques, affectent profondément ces diverses formations. L'observation de leurs relations est ainsi souvent rendue difficile.

LES MINERALISATIONS

Plus précisément, les minéralisations étudiées sont situées au NE de Bozdağ Tepe et au S.-E. de Boztepe (Fig. 2). Dans la zone minéralisée, les marbres dolomitiques, ankéritisés, et les roches volcaniques sont abondants et traversés par d'assez nombreux filons quartziques.

Deux types de minéralisations peuvent être distingués:

a) les minéralisations disséminées;

b) les minéralisations filoniennes.

Les minéralisations disséminées sont associées aux roches carbonatées, tandis que les minéralisations filoniennes apparaissent, soit au contact entre roches carbonatées et volcanites, soit dans ces dernières.

a) Les minéralisations disséminées

En étroite relation avec les roches carbonatées, les minéralisations disséminées sont localisées en particulier dans le puits de Büyük (puits no 5) et ses alentours et, moins développées, dans le puits de Derin (puits No 8) (Fig. 2).

Au nord de Boztepe, ces mêmes minéralisations s'observent également, dans les ankérites jalonnant les contacts marbres dolomitiques ankéritisés-volcanites ainsi que dans les zones où les marbres sont affectés par un jeu de failles E.-W. et N.-S. L'ankéritisation des marbres dolomitiques est liée à une phase hydrothermale antérieure responsable de la minéralisation qui se manifeste par la présence de *pyrite, chalcopyrite, blende* et *galène* disséminées.

b) Les minéralisations filoniennes

Ces minéralisations sont de loin les plus importantes. Il est possible de les répartir selon trois catégories: 1) *les filons massifs* au contact ankérites-volcanites;

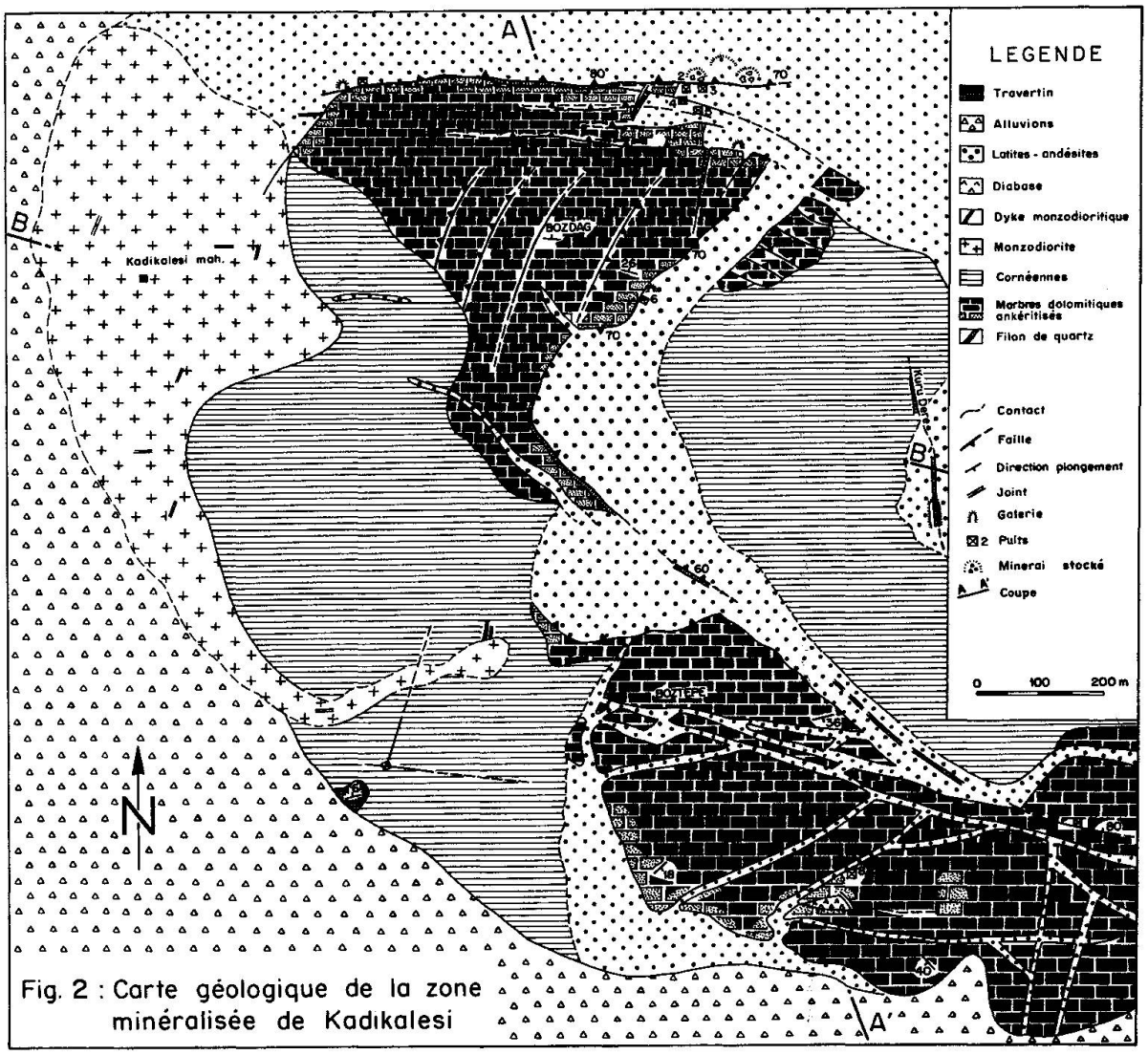

Fig. 2 : Carte géologique de la zone minéralisée de Kadıkalesi

Fig. 2

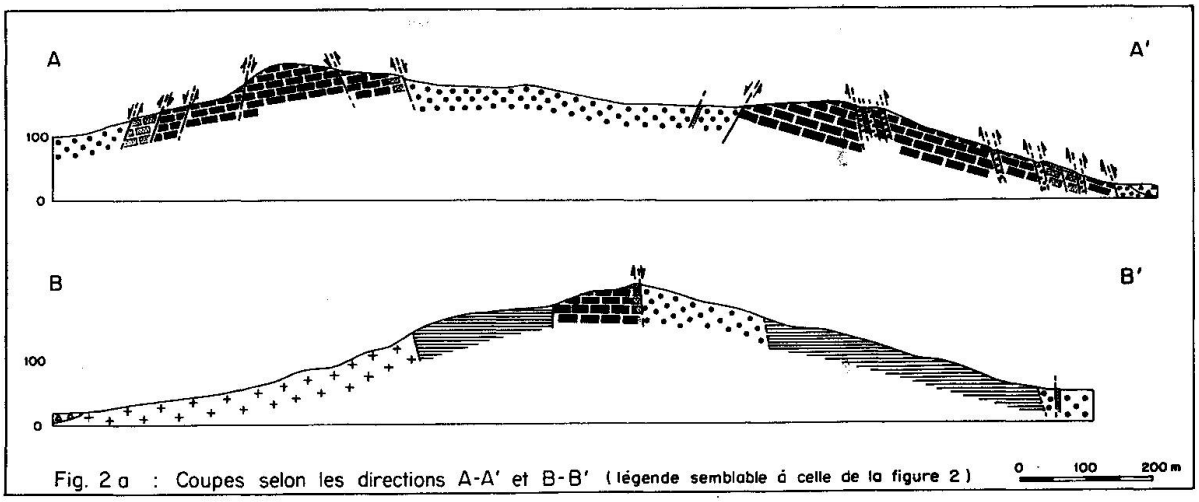

Fig. 2 a : Coupes selon les directions A-A' et B-B' (légende semblable à celle de la figure 2)

2) *les filons rubanés* dans les volcanites; 3) *les filons quartziques à structure irrégulière* dans les marbres dolomitiques ou les volcanites.

1) Les filons massifs

De telles minéralisations à Pb-Zn-Cu s'observent en particulier dans le puits de Derin (puits No 8) et dans le puits de Büyük (puits No 5).

Le plus important de ces filons est celui du puits de Büyük, au nord de Bozdağ Tepe, dans la zone de l'ancienne exploitation. Il a été exploité activement au début du 20ème siècle. Il convient de souligner que ce gisement est localisé dans un secteur où les failles E.-W. et N.-S. sont nombreuses et où il existe une étroite relation entre marbres dolomitiques ankéritisés et volcanites. Certaines de ces failles sont en effet à l'origine de déplacements, plus ou moins verticaux, de blocs ankéritiques dans les volcanites déterminant des pièges pour la minéralisation (Fig. 2 et 2a). Nos recherches dans la zone de l'ancienne exploitation ont démontré que les failles N.-S. viennent buter contre les failles E.-W. et que la minéralisation principale est contrôlée par une faille N. 140°-60° N.-E.

Nous avons relevé le plan de cette ancienne zone exploitée (Fig. 3). Il est intéressant de noter que les anciennes recherches et exploitations ont été fort

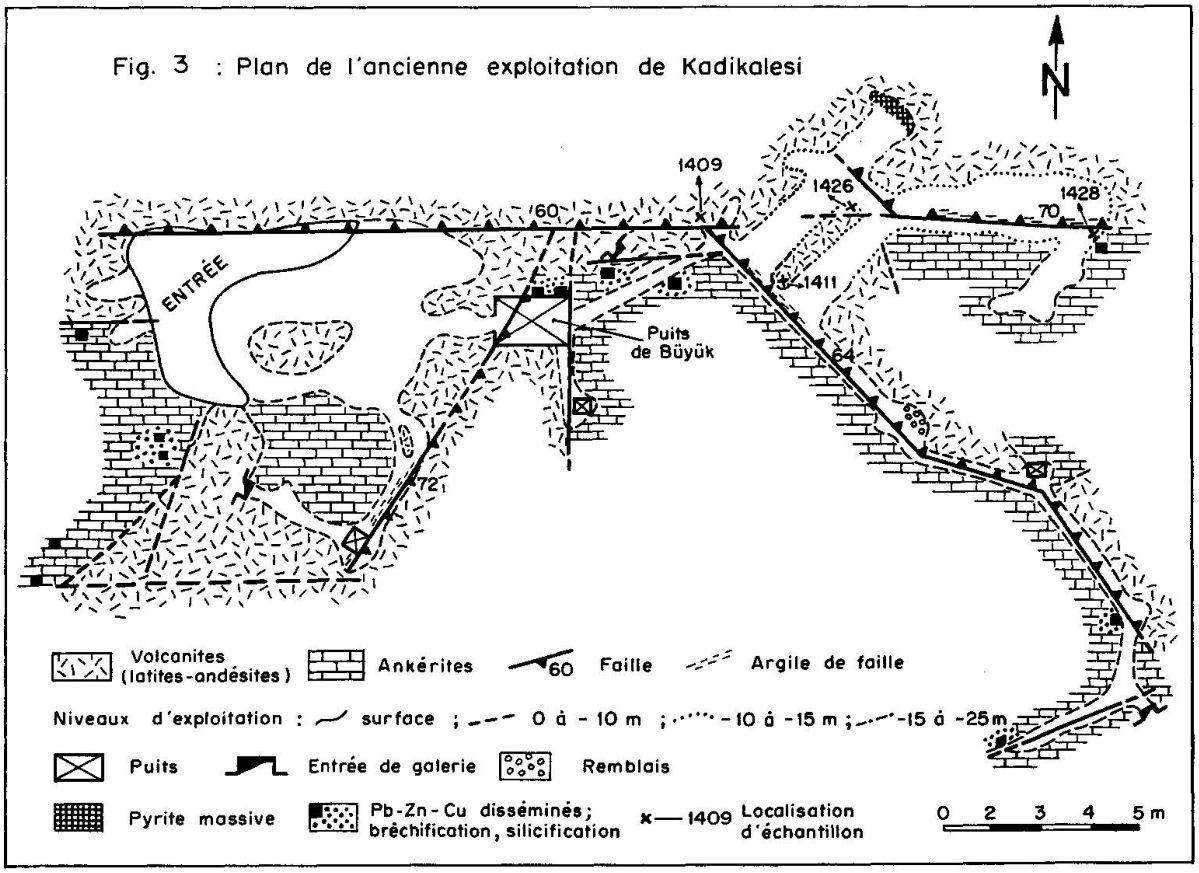

Fig. 3 : Plan de l'ancienne exploitation de Kadikalesi

nombreuses suivant les failles de directions N. 140°, E.-W., N.-E., S.-W. et N.-S. Les galeries du premier étage suivent la zone faillée et minéralisée de direction N. 140°.

Dans les ankérites, on observe une silicification et une minéralisation disséminée alors qu'une minéralisation filonienne massive s'est développée à proximité des volcanites. Situé à 15 mètres de profondeur, le deuxième étage de cette ancienne zone exploitée est atteint par l'intermédiaire de deux descendries ouvertes parallèlement au plongement de la faille N. 140° et qui suivaient probablement des colonnes minéralisées. La galerie du deuxième étage, orientée E.-W., a probablement été ouverte pour suivre le filon massif jalonnant la faille N. 140°. La paroi nord de cette galerie est entaillée dans les ankérites avec minéralisations disséminées de Pb-Zn-Cu; la paroi sud est constituée par des latites-andésites, une zone faillée séparant les deux types de roches.

La première des deux descendries mentionnées se prolonge au-delà du deuxième étage pour atteindre une profondeur de 25 m. permettant de constater qu'à la galène massive, visible au niveau du deuxième étage, fait suite une zone de pyrite massive.

2) Les filons rubanés

On trouve ce type de minéralisations dans le ruisseau Kuru, au N.-E. de Boztepe (Fig. 2). Les roches encaissantes sont des latites-andésites. Le plus important de ces filons, de direction N. 170°, se situe dans une zone faillée verticalement. D'une puissance de 1,40 m., il peut se suivre sur 12 m., se terminant, à ses extrémités, par ramifications (Fig. 2).

3) Les filons quartziques à structure irrégulière

Les filons de quartz, de direction E.-W., sont nombreux dans la région étudiée. Le plus important d'entre eux s'observe au nord de Bozdağ Tepe. Avec un plongement de 70° N., il s'étend sur près de 1 km. avec une puissance atteignant, par places, 1 m. (Fig. 2). Aux épontes de la plupart de ces filons, des traces de mouvements verticaux post-remplissage sont visibles. Mis à part les filons au nord de Bozdağ Tepe qui renferment, par places, et en particulier vers l'ancienne exploitation, de la *galène, pyrite* et *blende* disséminées, la plupart de ces filons sont stériles.

ETUDE MINERALOGIQUE ET PARAGENETIQUE

Les échantillons prélevés sur ces différents types de minéralisations ont été étudiés sous le microscope et certains de leurs minéraux analysés à l'aide de la microsonde électronique.

a) Les minéralisations disséminées dans les ankérites

Les échantillons des minéralisations disséminées dans les ankérites montrent que les minéraux métalliques, xénomorphes, isolés ou groupés, sont dispersés dans la gangue carbonatée localement silicifiée.

L'échantillon H 26,2, prélevé dans les ankérites près du puits de Büyük, est formé de sections de cristaux dodécaédriques de pyrite renfermant des inclusions ovales de chalcopyrite (I), de blende xénomorphe riche en exsolutions de chalcopyrite, d'un peu de tétraédrite-tennantite. De la galène (I), plus tardive, joue vis-à-vis des minéraux précités, le rôle de ciment; à partir des contours de grains, cassures et clivages, elle apparaît pseudomorphosée par la bournonite.

Dans les minéralisations de ce type, la galène est le minéral le plus répandu. En plus de sa pseudomorphose locale en bournonite, sa transformation en cérusite est fréquente.

Les fissures de la gangue carbonatée sont remplies par de la pyrolusite, de la pyrite à habitus squelettique et des hydroxydes de fer.

Dans les échantillons de roches carbonatées prélevés près des zones tectonisées, on peut remarquer qu'une seconde minéralisation s'est développée après la fracturation de la roche (échantillon 1422, par exemple). A la minéralisation principale, constituée de pyrite, de blende avec exsolutions de chalcopyrite, de chalcopyrite (II), de tétraédrite-tennantite avec inclusions de pyrite et blende, et de galène (I), fait suite cette minéralisation plus tardive avec formation de quartz (II) et de galène (II).

Les minéralisations disséminées s'observent aussi dans les ankérites en contact avec les volcanites, en particulier le long de la faille N. 140° où les roches carbonatées présentent une importante fracturation et silicification. L'échantillon H 26,31 récolté dans la galerie du premier étage, présente des groupements minéralisés formés de phases hypidiomorphes dispersées dans la gangue carbonatée localement silicifiée. La pyrite, premier minéral formé, en grains idiomorphes ou hypidiomorphes de 0,03-0,30 mm. de dimension, renferme des inclusions de gangue vers les bords des cristaux ainsi que des baguettes d'hématite (Fig. 4). La blende en grains xénomorphes de 0,07-0,5 mm. de dimension, montre un aspect zoné dû à une concentration d'inclusions de chalcopyrite (I) vers les bords des cristaux. La tétraédrite-tennantite, peu répandue, pseudomorphose la blende à partir des bords des grains. Le remplacement de la galène par la bournonite est ici peu avancé, contrairement à la transformation en cérusite, importante.

L'ordre de cristallisation des minéralisations disséminées dans les ankérites est donc le suivant:

(hématite) - (chalcopyrite ‹I›) - pyrite - blende - chalcopyrite (II) - tétraédrite-tennantite - galène (I) - quartz (I); phase de fracturation; *galène (II) - quartz (II) - bournonite;* paragenèses secondaires: *pyrite squelettique, cérusite, pyrolusite, hydroxydes de fer.* (Entre parenthèses, les phases minérales peu répandues.)

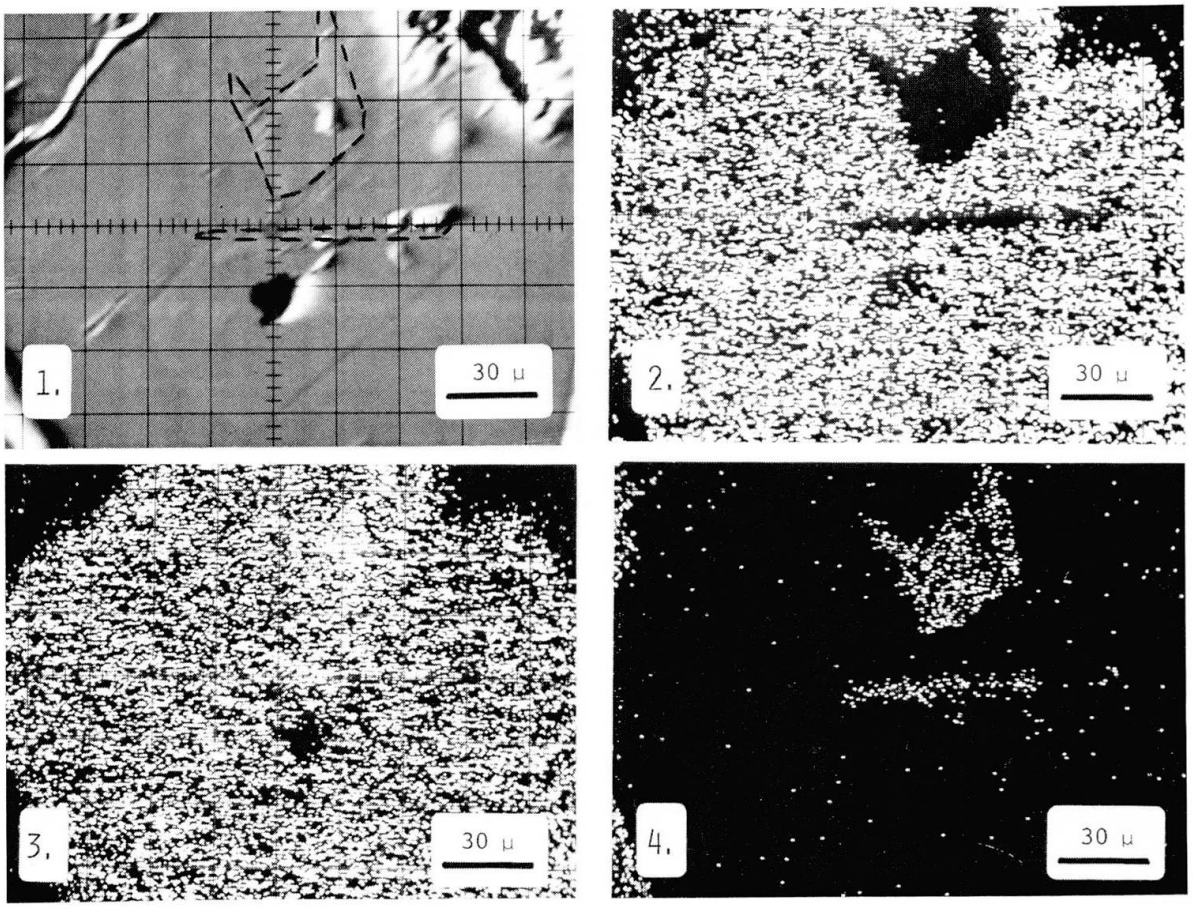

Fig. 4 Inclusions d'hématite dans la pyrite (prép. H 26,31).
1. : Image ē absorbés.
2., 3., 4. : Images X, respectivement $S_{K\alpha_{1,2}}$, $Fe_{K\alpha_{1,2}}$, $O_{K\alpha}$.

b) Les minéralisations filoniennes

1) Les filons massifs

Les échantillons récoltés dans les galeries de l'ancienne exploitation en permettent la meilleure étude.

L'échantillon 1409 montre la blende, riche en inclusions de chalcopyrite I, abondante. La pyrite, moins fréquente, se transforme en hydroxydes de fer. La chalcopyrite (II), en voie de remplacement par la covelline, entoure souvent la blende. Entre les plages de la gangue quartzique, ou par places carbonatée, on observe de la manganite et de la pyrolusite. Des cristallisations d'azurite et de malachite soulignent tant cassures et contours des minéralisations que ceux des plages de la gangue.

L'échantillon H 26,3-1411, récolté au premier étage de la mine, entre les deux descendries reliant ce niveau à l'étage inférieur, présente une structure granulaire. Les plages de pyrite bien que parfois idiomorphes et hypidiomor-

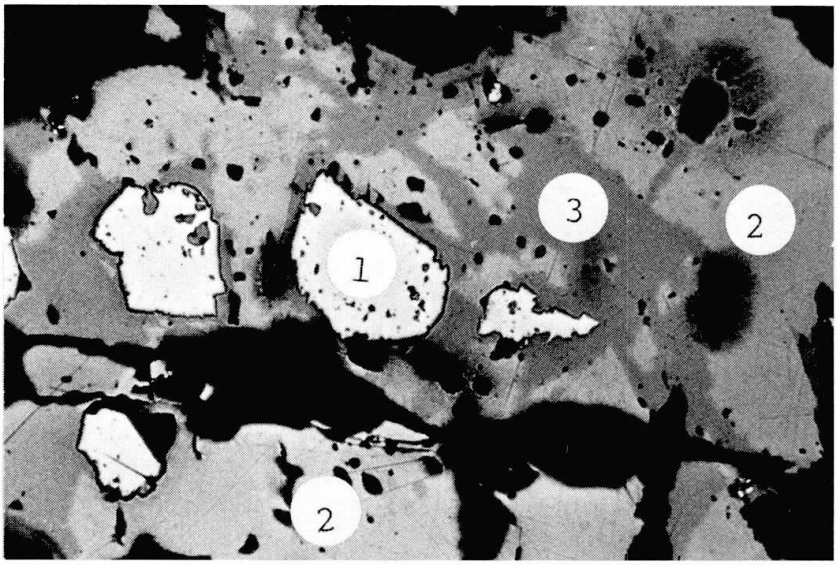

Fig. 5 Remplacement de la chalcopyrite (2) par la tétraédrite-tennantite (3); pyrite (1).
Grossis.: 250 x.
(de même que pour les figures 6, 7, 9 et 10, les chiffres entre parenthèses indiquent l'ordre de cristallisation).

phes sont généralement arrondies (dimension: 0,014-0,21 mm.); les fractures des grains sont remplies de tétraédrite-tennantite et de gangue. La blende, xénomorphe (dimension des grains: 0,020 mm.), montre des exsolutions de chalcopyrite disposées irrégulièrement. La chalcopyrite (II), abondante, est pseudomorphosée par de la tétraédrite-tennantite (Fig. 5). La galène (I) est remplacée, à partir de ses cassures et clivages, par de la bournonite (Fig. 6). La gangue quartzique, dont une partie est antérieure à la cristallisation de la galène (II), renferme un peu de carbonate.

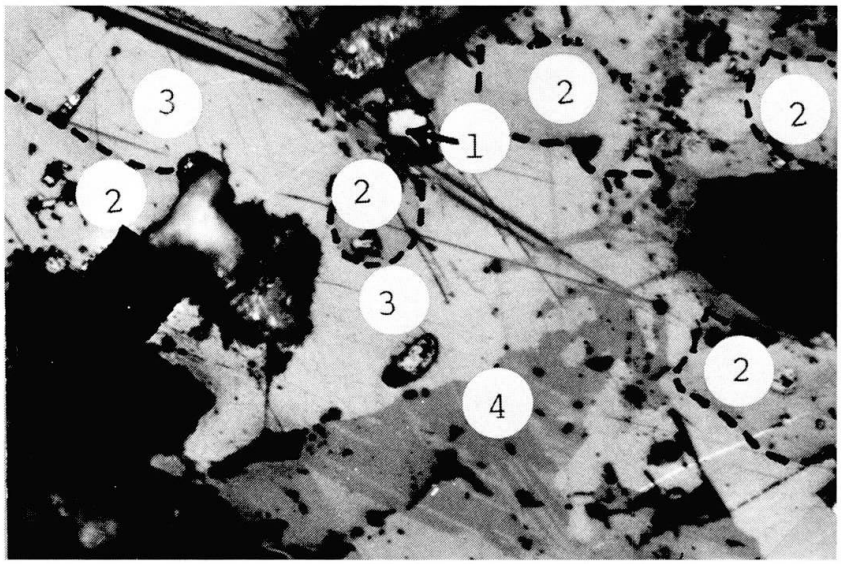

Fig. 6 Remplacement de la galène (3) par la bournonite (4); pyrite (1), chalcopyrite (2).
Grossis.: 250 x. Analyseur décroisé.

L'échantillon H 26,7-1426 a également été prélevé entre les deux descendries, mais au deuxième étage. Il est formé de grains idiomorphes ou xénomorphes de pyrite, souvent cassés, pris dans une gangue quartzique; des cavités, observées vers les bords des cristaux confèrent un aspect zoné à ce minéral, aspect encore souligné par des inclusions de chalcopyrite (I) disposée de la même manière. La blende, riche en exsolutions de chalcopyrite, forme des plages xénomorphes. La galène, abondante, et la chalcopyrite (II), sont respectivement remplacées par de la bournonite et par de la tétraédrite-tennantite.

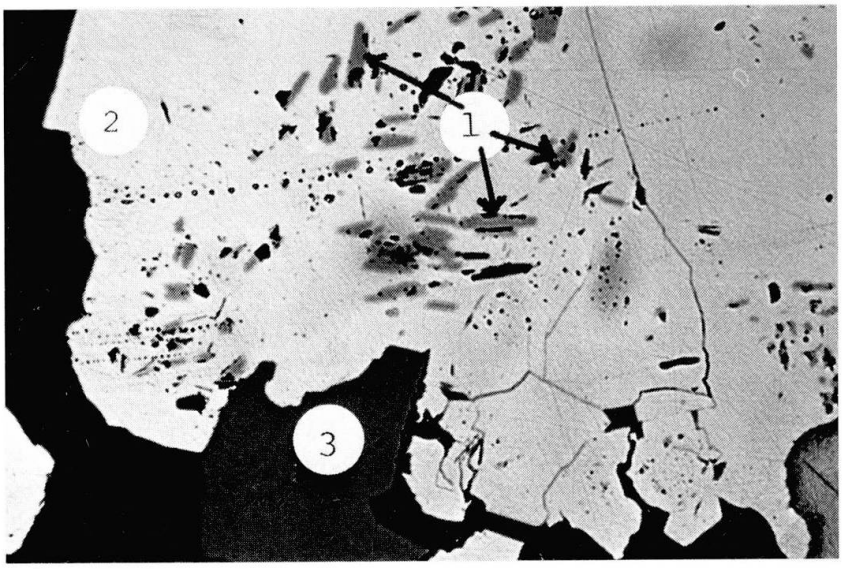

Fig. 7 Vestiges (?) d'hématite (1) orientés selon trois directions préférentielles dans la pyrite (2); blende (3). Grossis.: 250 x.

Un autre échantillon (1428), récolté à l'extrémité E. de la galerie du deuxième niveau, apparaît fortement cataclasé. Dans une gangue quartzique, la pyrite est abondante. Sur certaines sections de celle-ci, apparaissent parfois des sections d'hématite, orientées selon trois directions, et qui rappellent une structure micrographique (Fig. 7). Il semble qu'il s'agisse de vestiges d'hématite pseudomorphosée par la pyrite. Blende et chalcopyrite sont peu abondantes, de même que la tétraédrite-tennantite, en inclusions dans la galène elle-même en voie de remplacement par de la bournonite et de la cérusite.

De l'étude de ces divers échantillons, il ressort que l'ordre de cristallisation dans ces minéralisations filoniennes massives est le suivant: *(hématite) - (chalcopyrite ‹I›) - pyrite - blende - chalcopyrite (II) - tétraédrite-tennantite - galène (I) - quartz (I); galène (II) - quartz (II) - bournonite;* paragenèses secondaires: *covelline, pyrolusite, malachite-azurite, hydroxydes de fer.* (Entre parenthèses: phases minérales peu répandues).

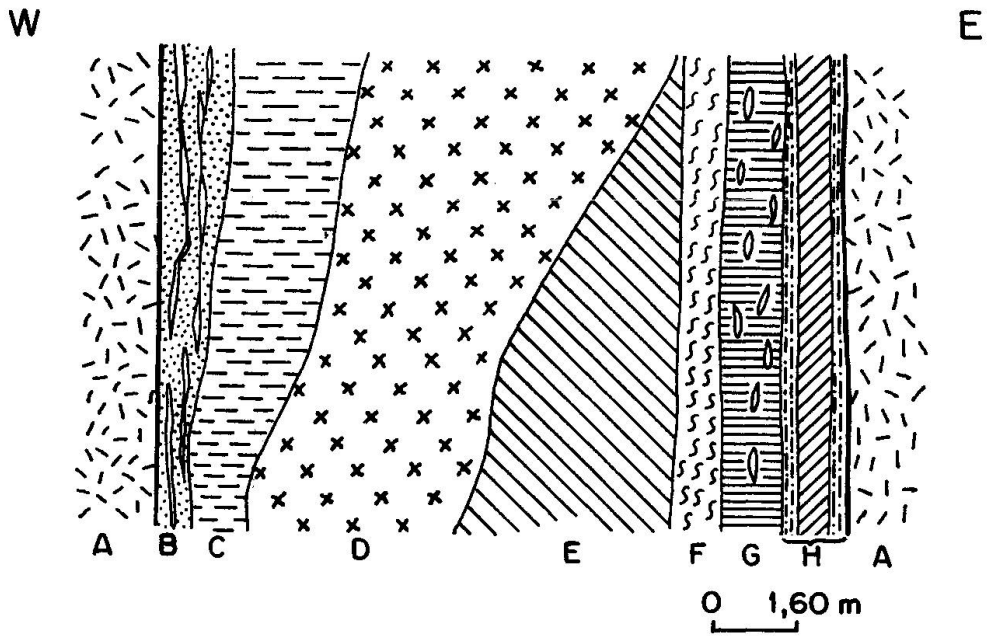

Fig. 8 Coupe schématique du filon du ruisseau Kuru.
A: latite andésitique encaissante avec pyrite disséminée et filonnets minéralisés.
B: zone d'écrasement avec filonnets minéralisés à structure symétrique.
C: zone bréchique silicifiée avec pyrite, blende et galène disséminées et fragments minéralisés dispersés.
D: zone riche en quartz, avec pyrite et un peu de galène disséminées.
E: écaille bréchifiée de roche encaissante.
F: zone écrasée, argileuse et silicifiée.
G: zone à lentilles siliceuses avec galène et pyrite disséminées et oxydes de fer et manganèse.
H: zone, délimitée par 2 salbandes et zones d'écrasement, avec pyrite, galène et blende disséminées.

2) Les filons rubanés

Les plus importantes minéralisations de ce type, qui recoupent les latites-andésites, se rencontrent dans le ruisseau Kuru, à 600 m. au N.-E. de Boztepe (Fig. 2). Une coupe de l'un de ces filons, montrant plusieurs zones distinctes, est donnée sur la figure 8. Sur un échantillon prélevé dans le filonnet tardif de la zone B (Fig. 9), on observe, du bord vers le centre: - une zone riche en galène; - une zone avec blende, peu de pyrite, galène et chalcopyrite; - enfin, une zone peu minéralisée avec chalcopyrite, pyrite, galène et tétraédrite-tennantite. Les parois délimitant le centre vide du filonnet sont tapissées de cristaux de quartz (II).

La paragenèse de ces filonnets minéralisés est donc la suivante:

galène - blende - (chalcopyrite) - pyrite - quartz (I) - carbonate - (tétraédrite-tennantite) - quartz (II). (Entre parenthèses: phases minérales peu abondantes).

Un échantillon (éch. 1435 provenant de la zone C (Fig. 10) montre une structure bréchique avec un ciment quartzo-carbonaté. Les fragments minéralisés sont constitués de pyrite, blende, galène, chalcopyrite distribués en couches; par ailleurs, pyrite, blende et galène disséminées apparaissent dans le ciment.

La succession minérale observée dans cette zone bréchique est donc: *pyrite -*

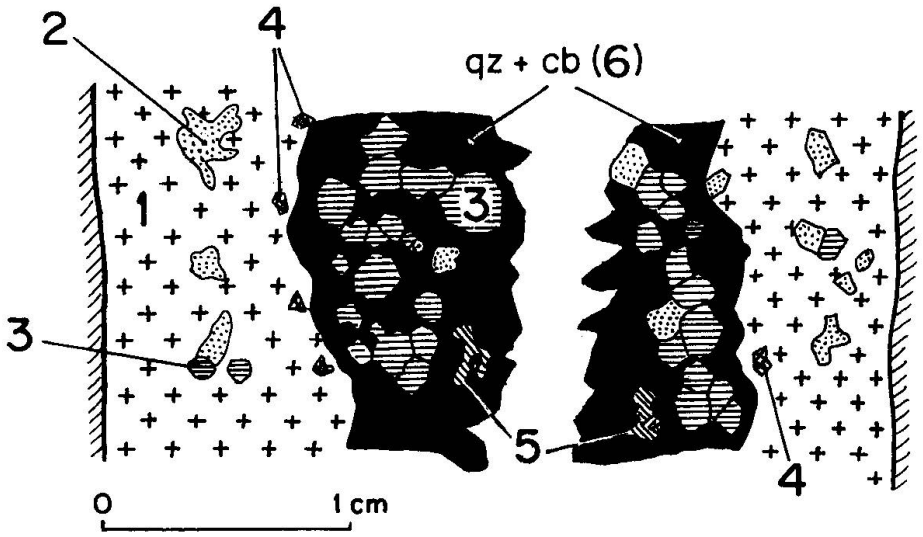

Fig. 9 Coupe dans un filonnet tardif minéralisé de la zone B du filon du ruisseau Kuru.
Galène (1), blende (2), pyrite (3), chalcopyrite (4), tétraédrite-tennantite (5); gangue: quartz (qz) et carbonate (cb) (6).

blende - chalcopyrite - galène - quartz - carbonate. Après la phase de bréchification, *pyrite, blende, galène* et *quartz* se forment à nouveau (remobilisation?).

Les paragenèses observées dans ces filons recoupant les roches volcaniques se différencient donc de celles des minéralisations disséminées dans les ankérites, de même que de celles des minéralisations filoniennes massives, par la ra-

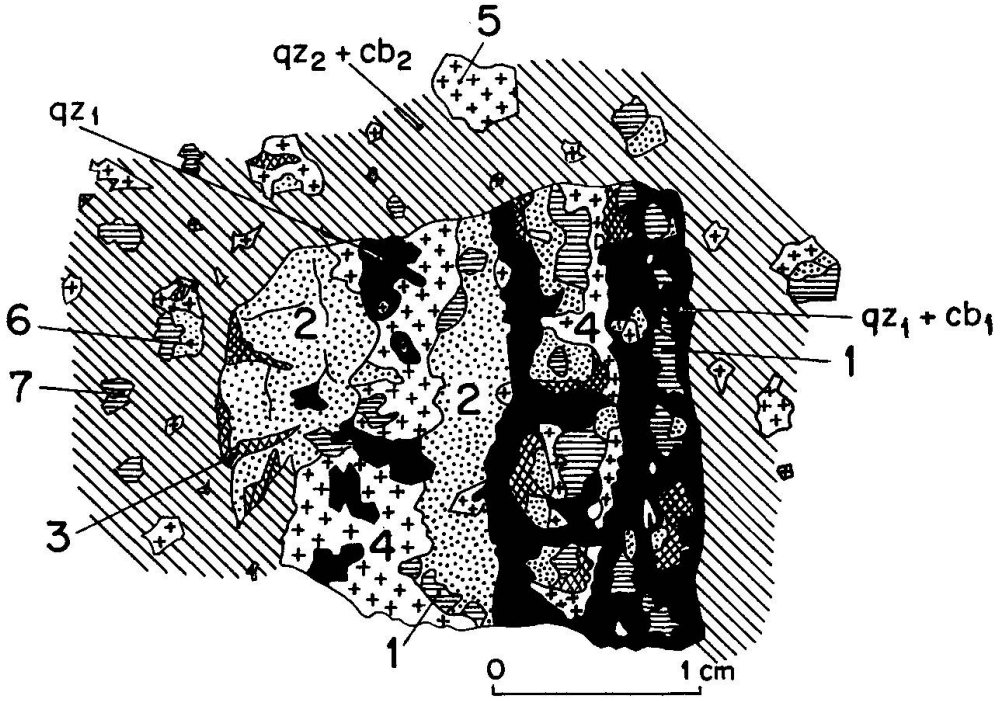

Fig. 10 Zone bréchique (C) du filon du ruisseau Kuru.
Pyrite (1), blende (2), chalcopyrite (3), galène (4); gangue: quartz et carbonate (qz_1 et cb_1) de première génération.
Galène (5), blende (6), pyrite (7), quartz et carbonate (qz_2 et cb_2) de seconde génération.

reté de la chalcopyrite et de la tétraédrite-tennantite et par l'absence de bournonite (Tableau I).

D'autre part, en considérant l'ensemble des diverses zones des filons associés aux roches volcaniques, il est possible de faire la remarque suivante: la paragenèse minérale est semblable à celles des minéralisations disséminées dans les ankérites et filoniennes massives. Par contre, lors du stade faisant suite à la bré-

Type de minéralisation / Minéral	Disséminée dans les ankérites	Filonienne: Filons massifs	Filonienne rubanée: zone bréchique	Filonienne rubanée: filonnets tardifs	Filons quartziques à structure irrégulière
(Hématite)	—	—			
(Chalcopyrite (I))	—	—			
Pyrite	—	—	— —	—	—
Blende	—	—	— —	—	—
(Chalcopyrite (II))	—	—	—	—	
Tetraédrite-Tennantite	—	—		—	
Galène (I)	—	—	— —	—	
Quartz (I)	—	—	—	—	—
Galène (II)	—	—			—
Quartz (II)	—	—	—	—	—
Bournonite	—	—			
Carbonate			—	—	
Paragenèses secondaires	pyrite squelettique, cérusite, pyrolusite, hydroxyde de fer	covelline, pyrolusite, malachite - azurite, hydroxyde de fer	(entre parenthèses: phases minérales peu répandues)		

fracturation

bréchification

Tableau I : Paragenèses minérales dans les divers types de minéralisation de Kadikalesi

chification des minéralisations filoniennes dans les roches volcaniques, la succession minérale est différente dans les filonnets tardifs à structure symétrique, la galène cristallisant la première et la pyrite apparaissant en dernier lieu (Tableau I).

3) Les filons quartziques à structure irrégulière

Les minéralisations disséminées observées dans les filons quartziques (échantillons 1406 et 1408, par exemple) renferment surtout de la galène se transformant en cérusite. A côté de la galène, mais moins répandus, de petits grains idiomorphes de pyrite et d'autres, xénomorphes, de blende s'observent; dans cette dernière, on remarque des exsolutions de chalcopyrite d'orientation

irrégulière. La cristallisation de la gangue quartzeuse a débuté avant celle de la galène pour se terminer après.

La paragenèse de ces minéralisations est donc la suivante: *pyrite - blende - quartz - galène -quartz.*

Le tableau I rassemble les paragenèses observées dans ces divers types de minéralisations.

DONNEES MINERALOGIQUES ET ANALYTIQUES SUR LES DIVERSES ESPECES MINERALES RENCONTREES

L'étude microscopique des minéralisations considérées a comporté des mesures du pouvoir réflecteur et de la microdureté. Une huile d'immersion de type D/B a été utilisée. Les valeurs quantitatives du pouvoir réflecteur, pour diverses longueurs d'onde (466,549 et 655 nm), ont été obtenues à l'aide d'un photomultiplicateur EMI muni d'un microphotomètre MPV Leitz. Les standards employés ont été le carbure de tungstène (474253 No 070), la pyrite et le silicone. La détermination des microduretés a été effectuée avec un appareil G.K.N. Micro Hardness Tester et des charges variant entre 10 et 100 gr.

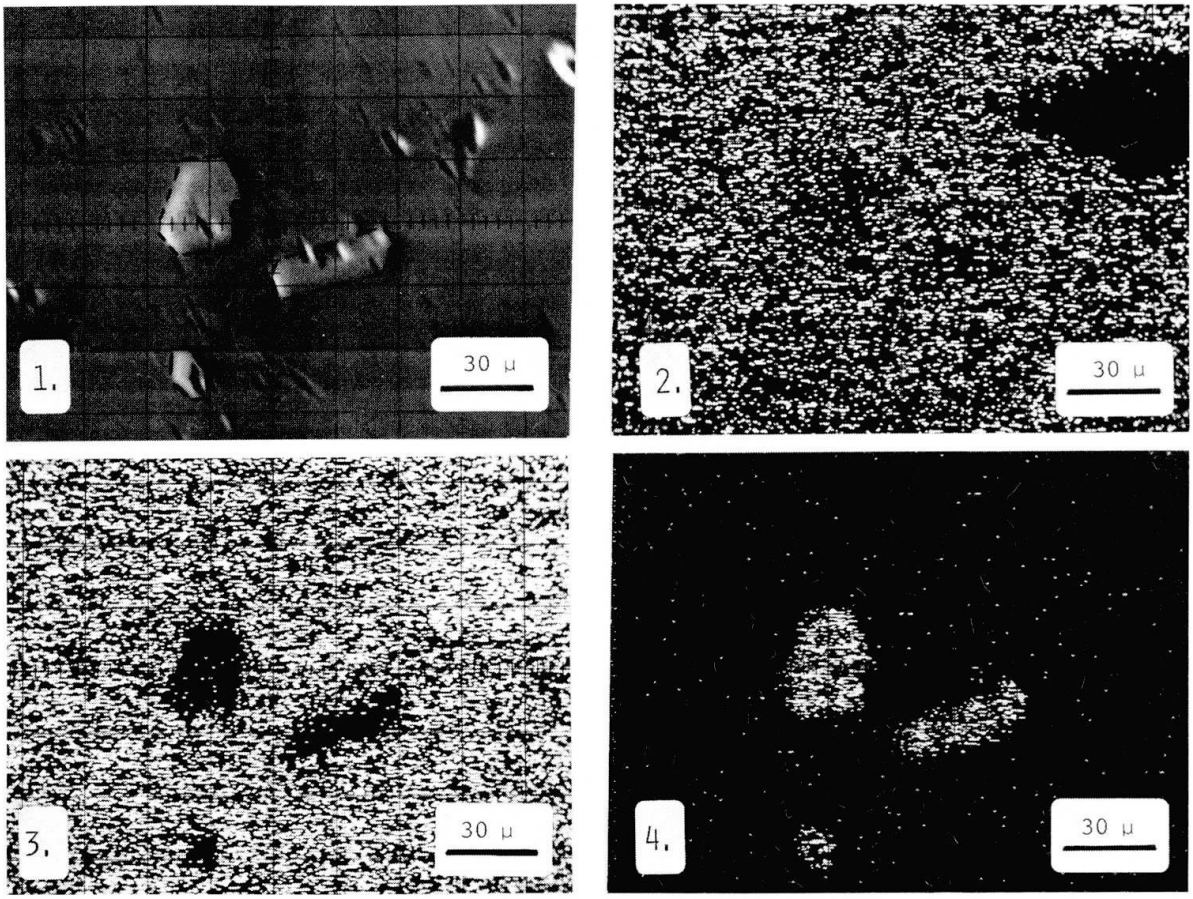

Fig. 11 Inclusions de blende dans la pyrite (prép. H 26,31).
1. Image ē absorbés.
2., 3., 4.: Images X, respectivement $S_{K\alpha_{1,2}}$, $Fe_{K\alpha_{1,2}}$, $Zn_{K\alpha_{1,2}}$.

Les analyses à la microsonde ont été réalisées avec un appareil ARL de type EMX-SM. En prenant en considération les divers minéraux analysés, des mesures qualitatives préalables ont été effectuées sur les éléments suivants: S, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Ag, Sb, Au, Hg, Pb et Bi. Les conditions expérimentales pour les analyses quantitatives ont été: - tension accélératrice: 15 et 20 kV; - courant d'échantillon (mesuré sur Al_2O_3): 50 nA; - temps de comptage déterminé par un courant de sonde digitalisé constant; - conduction des échantillons et standards assurée par le dépôt sous vide d'une couche de carbone. Excepté ZnS, GaAs et PbS, les standards utilisés ont été les éléments purs.

L'ensemble des données obtenues, et tout particulièrement celles concernant les minéraux primaires, peut se résumer comme suit:

Pyrite

Avec la galène et la blende, c'est une des espèces les plus répandues. Elle se présente en général en sections porphyroblastiques et renferme de rares inclusions de blende (Fig. 11).

Les valeurs de pouvoir réflecteur, de même que celles de microdureté sont en accord avec les données classique de la littérature. A part les éléments constitutifs majeurs de la pyrite, ont été détectés: le Cu, en traces, et distribué de façon régulière en dehors des zones d'influence de le tétraédrite-tennantite; le Pb, rencontré en sub-traces. En plus des inclusions de blende, la pyrite peut contenir de rares sections de 0.005 mm. de long, anisotropes, avec réflexions internes rouges. Les mesures du pouvoir réflecteur sur ces plages ont donné les résultats suivants:

λ	*air*	*huile*
466 nm.	28,0-30,5	13,4-18,0
549 nm.	26,3-30,3	12,2-15,3
655 nm.	24,2-26,4	9,6-12,0

La petitesse de ces sections n'a pas permis d'en mesurer la microdureté. Toutefois, caractères optiques et analyses à la microsonde indiquent qu'il s'agit d'hématite (Fig. 4).

Blende

Egalement un des minéraux les plus répandus, la blende, à part quelques rares exceptions, se forme après la pyrite. Le plus souvent en plages xénomorphes de dimensions variables (0,7-0,015 mm.), la blende renferme souvent des

exsolutions de chalcopyrite dont la distribution lui confère un aspect zoné. Cette zonation, bien que relativement peu marquée, est confirmée par les profils de distribution de Fe et Cu ainsi que de Mn. La blende montre également des inclusions de pyrite. Des réflexions internes dans les tons blancs indiquent une faible teneur en Fe, ce qui est confirmé par les résultats des analyses données ci-après. Plusieurs mesures de microdureté ont donné des résultats variant entre 185 et 235. Quant aux valeurs du pouvoir réflecteur, elles sont les suivantes:

λ	*air*	*huile*
466 nm.	15,7	5,2
546 nm.	17,0	4,8
655 nm.	16,8	4,4

Les valeurs obtenues dans l'air paraissent un peu faibles; ceci est probablement lié à la composition de cette blende dont le paramètre a_0 de la maille élémentaire est de 5,410 ± 0,003 Å (détermination à l'aide de la caméra Gandolfi).

Deux échantillons de blende (H 26,2 et H 26,31) provenant des minéralisations disséminées dans les ankérites et un échantillon de blende (H 26,3) associée aux minéralisations filoniennes massives ont été analysés. Mn et Pb s'observent, en traces, dans le type filonien seulement, tandis que Fe et Cu, également en traces, sont présents dans les deux types de minéralisations. Dans ces trois échantillons, Hg n'a pas été détecté. Les analyses quantitatives des éléments majeurs ont été réalisées sur des plages des minéralisations disséminées (éch. H 26,31) et filoniennes massives (éch. H 26,3).

La moyenne des résultats obtenus sur trois points de mesure de la blende des minéralisations disséminées est la suivante:

	% poids	*rapports atomiques*
Zn	66,42 (± 0,26)	1,016
Fe	0,33 (± 0,02)	0,006
S	33,93 (± 0,21)	1,027
Total	100,68	

En posant S = 1, on obtient la formule $Zn_{0,989}Fe_{0,006}S_1$. Les points de mesure ont été choisis dans une zone sans exsolutions de chalcopyrite et l'on peut constater l'absence de Cu.

Quatre points de mesure sur la blende des minéralisations filoniennes massives ont donné les valeurs moyennes suivantes:

	% poids	*rapports atomiques*
Zn	65,44 (± 0,90)	1,001
Fe	0,33 (± 0,05)	0,006
Cu	0,61 (± 0,21)	0,009
S	32,80 (± 0,10)	1,013
Total	99,18	

Egalement obtenus sur une zone dépourvue d'exsolutions de chalcopyrite, ces résultats conduisent à la formule $Zn_{0,988}Fe_{0,006}Cu_{0,009}S_1$.

Il ressort de ces analyses que la teneur en fer est assez faible et très comparable dans la blende de deux types de minéralisations. Le cuivre, par contre, présente une variation plus significative. La présence de cet élément dans des zones apparemment exemptes d'exsolutions de chalcopyrite traduit peut-être la présence d'exsolutions submicroscopiques. Toutefois, sur la base des résultats obtenus, on constate l'insuffisance de fer pour pouvoir éliminer le cuivre en formant de la chalcopyrite; en effet, excepté en un point, il subsiste un excès de Cu (0,37%). Ce surplus révèle peut-être, soit la présence de cuivre dans la structure, soit qu'il existe des inclusions submicroscopiques de nature différente que la chalcopyrite. En résumé, bien que présent en faibles concentrations, le cuivre est tout de même plus abondant que le fer et ceci particulièrement dans la blende des minéralisations filoniennes massives, plus riches en exsolutions de chalcopyrite.

La présence des exsolutions de chalcopyrite dans la blende a été utilisée depuis longtemps (Veen, 1925) comme géothermomètre. Bien que cette méthode ne donne pas toujours des résultats concordants et sûrs, son principe a été accepté universellement. Marmo (1953) a démontré que les exsolutions de chalcopyrite dans la blende se forment très probablement à des températures comprises entre 350° et 400°C.

L'abondance des exsolutions de chalcopyrite dans les blendes de Kadıkalesi jointe à l'absence de minéaux tels cubanite et vallérite, caractéristiques du stade catathermal, paraissent démontrer que ce minéral s'est formé en dessous des conditions hypothermales. L'absence d'éléments tels Sn, Mo et W, indiquant de hautes températures de formation, vient corroborer ce point de vue.

Chalcopyrite

Relativement peu répandue, la chalcopyrite ne s'observe pas dans toutes les paragenèses. Sa cristallisation est postérieure à celle de la pyrite et de la blende. Elle se présente, en général, en grains xénomorphes de 0,03-1,15 mm. et, comme déjà mentionné, en exsolutions dans la blende. Son remplacement par la tétraédrite-tennantite est assez fréquent (Fig. 5).

Les mesures de pouvoir réflecteur donnent les valeurs suivantes:

λ	*air*	*huile*
466 nm.	24,3-28,3	21,6-27,0
549 nm.	41,5-44,7	31,7-34,2
655 nm.	24,2-48,7	33,4-36,3

Les valeurs de la microdureté sont comprises entre 229 et 268.

Les analyses à la microsonde, à part Cu, Fe et S, ne révèlent pas la présence d'autres éléments détectables.

Tétraédrite-tennantite

De même que la chalcopyrite, les termes de cette série ne sont pas très répandus. Ils se présentent souvent en grains xénomorphes de 0,14-0,25 mm. et renfermant des vestiges et inclusions de chalcopyrite. Leur cristallisation débute après celle de la chalcopyrite mais prend fin avant que cette dernière n'ait fini de se former.

Sous le microscope, les termes de cette série se caractérisent par leur isotropie, les tennantites se distinguant par une couleur bleue plus soutenue et des réflexions internes bien discernables.

Les mesures de pouvoir réflecteur ont donné les valeurs suivantes:

λ	*air*	*huile*
466 nm.	30,0	16,5
549 nm.	30,3	18,2
655 nm.	27,7	13,6

Les valeurs de la microdureté s'échelonnent entre 339 et 368.

Les tétraédrite-tennantites de deux échantillons, l'un provenant des minéralisations disséminées dans les ankérites (éch. 1429) et l'autre de la minéralisation filonienne massive du premier étage de l'ancienne exploitation (éch. 1411), ont été analysés à la microsonde. Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau II.

L'examen de ce tableau permet de faire la distinction entre:

- Zones presque dépourvues de Sb avec une teneur maximum d'As (tennantite); la distribution des éléments est uniforme.
- Zones, distribuées irrégulièrement, à teneurs d'As plus basses mais de Sb plus élevées. Ces variations traduisent la substitution entre As et Sb et l'association de divers termes de cette série isomorphe.

Tableau II: Analyses chimiques des tétraédrite-tennantites de Kadikalesi.
(échantillon 1429 : minéralisation disséminée dans les ankérites;
échantillon 1411 : minéralisation filonienne massive).

	Elements (% poids)							Total	Formule atomique (base: S = 13)
	Cu	Zn	Fe	Pb	As	Sb	S		
1429	42,56	7,55	1,53	0,03	19,71	0,06	28,08	99,52	$(Cu_{9,943}Zn_{1,707}Fe_{0,401})As_{3,903}S_{13}$
	40,07	4,14	3,50	0,42	8,97	15,75	26,57	99,42	$(Cu_{9,895}Zn_{0,988}Pb_{0,03})(Sb_{2,022}As_{1,882})S_{13}$
	39,33	4,59	3,11	0,46	5,59	20,68	25,45	99,21	$(Cu_{10,135}Zn_{1,146}Fe_{0,917}Pb_{0,003})(Sb_{2,783}As_{1,228})S_{13}$
	38,12	4,03	3,78	0,83	2,89	24,52	25,07	99,24	$(Cu_{9,974}Zn_{1,031}Fe_{1,130}Pb_{0,066})(Sb_{3,341}As_{0,648})S_{13}$
1411	42,61	7,63	1,47	0,07	19,55	0,28	27,96	99,57	$(Cu_{10,003}Zn_{1,744}Fe_{0,388})(As_{3,891}Sb_{0,030})S_{13}$
	41,95	6,68	1,12	0,33	16,49	5,12	27,53	99,22	$(Cu_{9,988}Zn_{1,816}Fe_{0,303}Pb_{0,030})(As_{3,329}Sb_{0,636})S_{13}$
	40,12	6,59	1,52	0,28	11,85	12,13	26,77	99,26	$(Cu_{9,824}Zn_{1,572}Fe_{0,420}Pb_{0,016})(As_{2,460}Sb_{1,557})S_{13}$
	39,87	6,89	1,23	0,29	8,59	14,70	26,48	98,05	$(Cu_{9,868}Zn_{1,653}Fe_{0,346}Pb_{0,016})(As_{2,015}Sb_{1,904})S_{13}$

Etant donné leur teneur appréciable en Zn, les zones à teneur maximum d'As correspondent à une variété de tennantite parfois désignée sandbergéritique. Dans les parties à faibles teneurs en As, le terme tétraédrite est dominant. Dans l'échantillon 1411, As est généralement plus abondant que Sb, ce qui indique la prépondérance de la composante tennantite.

Dans les deux échantillons, dans les zones à teneur en As maximum et à concentration en Zn élevée, celle en Fe est basse; ces deux derniers éléments montrent donc une relation antipathique.

On relèvera encore, avec l'augmentation de la teneur en Sb, une augmentation de celle en Pb, accompagnée d'une diminution des concentrations en Cu, As et S.

Ces dernières années, plusieurs travaux ont été entrepris sur des systèmes, souvent à trois, rarement à quatre composants, avec pour but d'améliorer nos connaissances sur la série tétraédrite-tennantite. Par ailleurs, il est bien connu qu'à part les composants principaux (Cu, Sb, As, S), des éléments tels Fe, Zn, Ag et Hg peuvent entrer dans le système tétraédrite-tennantite et jouer un rôle important sur la stabilité de ces divers termes. TATSUKA et MORIMOTO (1973, 1977) ont étudié, à 250°C, des tétraédrites exemptes de Fe et d'autres avec 1,724% atomique de Fe. Ils ont constaté que la tétraédrite sans Fe se dissociait en famatinite, digénite et Sb, la variété avec Fe restant par contre stable à cette température. Les mêmes auteurs ont également démontré qu'avec un accroissement de la teneur en Fe, la dimension de la maille élémentaire et la microdureté de la tétraédrite augmentaient.

Pour la série tétraédrite-tennantite de Kadıkalesi, sur la base de la teneur en Fe, des dimensions de la maille élémentaire, des valeurs de microdureté et de l'absence de famatinite et de digénite, il est possible d'envisager des températures de formation supérieures à 250°C.

Boulangérite

Très rare, ce minéral se rencontre en inclusions ovoïdes dans la galène.

Galène

La galène est très fréquente dans toutes les paragenèses observées. En sections en général xénomorphes de 0,14 à 0,42 mm. de dimension, elle est le dernier minéral opaque primaire à se former. Sa transformation en bournonite et en cérusite est assez fréquente. Les analyses effectuées ne révèlent, en traces détectables, que la présence d'Ag, Bi et Hg; la distribution de ces éléments est régulière. L'existence de traces d'Ag a été interprétée comme un indice d'une cristallisation à des températures supérieures à celles des conditions épithermales (SCHROLL, 1955; HERTEL, 1966).

Bournonite

La bournonite, tant dans les minéralisations disséminées dans les ankérites que dans les minéralisations filoniennes massives, apparaît comme le dernier minéral se formant et ceci aux dépens de la galène. Sa couleur de réflectance, plus foncée et bleutée par rapport à celle de la galène, sa faible anisotropie, la présence de macles polysynthétiques (Fig. 6), rendent sa reconnaissance aisée.

Les valeurs quantitatives de pouvoir réflècteur sont les suivantes:

λ	*air*	*huile*
466 nm.	32,7-35,4	20,9-22,5
549 nm.	33,7-36,2	19,8-21,3
655 nm.	31,6-33,2	17,5-18,8

Celles de la microdureté sont comprises entre 174 et 268.

Les analyses réalisées sur la bournonite ont révélé des sub-traces d'Ag et Fe distribuées régulièrement. Ces analyses ont d'autre part permis de mettre en évidence deux domaines différents:

- l'un avec teneur minimum en As et distribution régulière des éléments;
- l'autre, en général sous forme de zones étroites, où la teneur en As varie entre un minimum et un maximum, ceci de manière irrégulière; l'augmentation de la teneur en As est compensée par la diminution de celle en Sb. Les profils de distribution semblent indiquer que cette substitution se fait sans qu'il y ait de phases distinctes.

A partir de trois points de mesures choisis dans le domaine à teneur en As minimum, les valeurs moyennes suivantes ont été obtenues:

	% poids	*rapports atomiques*
Cu	13,21 (± 0,12)	0,208
Pb	42,27 (± 0,21)	0,204
Sb	24,26 (± 0,56)	0,199
As	0,48 (± 0,12)	0,006
S	19,41 (± 0,13)	0,605
Total	99,63	

Sur la base de S = 3, la formule qui en résulte est la suivante:

$$Cu_{1,031}Pb_{1,012}Sb_{0,987}As_{0,030}S_3.2212,0759$$

Toujours sur la base de trois points de mesures, mais ceux-ci dans les zones à teneur maximum en As de l'autre domaine, les résultats sont les suivants:

	% poids	*rapports atomiques*
Cu	13,49 (± 0,23)	0,212
Pb	44,39 (± 0,50)	0,214
Sb	18,13 (± 0,60)	0,149
As	4,03 (± 0,66)	0,054
S	19,71 (± 0,23)	0,615
Total	99,75	

Sur la base de S = 3, on obtient la formule:

$$Cu_{1,034}Pb_{1,044}Sb_{0,727}As_{0,263}S_3.$$

Ces analyses montrent que la bournonite étudiée, dans le domaine à teneur minimum en As, a une composition très proche de celle de la formule théorique $CuPbSbS_3$.

Dans le domaine à teneurs variables en As, les analyses effectuées indiquent une substitution partielle de Sb par As; ce remplacement s'opère sans qu'il y ait apparition de deux phases différentes, conformément à une solution solide entre bournonite et séligmanite (Ramdohr, 1969; Wu et Birnie, 1977).

Les faibles variations de teneurs en Pb observées sont probablement liées à des vestiges de galène ayant échappé au remplacement total.

Azurite, malachite, cérusite, pyrite squelettique et oxydes de Fe et Mn, également associés aux minéralisations Pb-Zn-Cu de Kadıkalesi, doivent leur formation aux processus d'altération superficielle.

CONCLUSIONS

Les minéralisations hydrothermales Pb-Zn-Cu de Kadıkalesi s'observent en relation étroite avec des roches carbonatées et volcaniques. Du point de vue typomorphologique, il s'agit de minéralisations filoniennes, ces dernières étant généralement de caractère métasomatique.

La paragenèse principale est la suivante: *pyrite* (avec inclusions d'hématite et de blende) - *blende* (avec inclusions de pyrite et chalcopyrite) - *chalcopyrite-tétraédrite-tennantite* (avec inclusions de chalcopyrite) - *galène* (avec inclusions de chalcopyrite et boulangérite) - *bournonite*. La gangue est quartzique et carbonatée. La texture est disséminée ou massive. A côté de cette paragenèse principale on observe, dans les minéralisations filoniennes associées aux roches volcaniques, une association minérale différente, faisant suite à la précédente et comprenant: *galène-blende-pyrite-chalcopyrite-tétraédrite-tennantite-quartz-carbonate*. L'observation de cette deuxième paragenèse, avec récurrences minérales, est le reflet d'une remobilisation.

Tant les relations paragénétiques que les résultats des diverses mesures effectuées indiquent que ces minéralisations se sont formées dans des conditions mésothermales.

De récentes études, en Anatolie occidentale, ont abouti à la mise en évidence de plusieurs petits massifs plutoniques présentant de nombreux points communs au niveau de leurs dimensions, structures, compositions minéralogique et chimique, de leurs minéralisations également et, pour ceux situés en dehors du massif de Menderes, de leur association à un volcanisme alcalin (SAVAŞÇIN et al., 1979). Certaines de ces intrusions et manifestations volcaniques ont été datées du Miocène inférieur à moyen.

En plusieurs endroits, des minéralisations plombo-zincifères sont liées à ces plutonites: à Maden Adası, Ayvalık, Foca, Yamanlar (Izmir), Cumaovası, Gümüldür, Istanköy Adası, par exemple. Par ailleurs, à l'intérieur même du massif de Menderes, plusieurs minéralisations de mispickel sont associées à des intrusions calco-alcalines d'âge miocène (UZKUT, 1977).

Il convient donc de distinguer, en Anatolie occidentale, ces diverses minéralisations de celles de la chaîne taurique, également plombo-zincifères et étudiées par plusieurs auteurs, mais qui apparaissent principalement contrôlées par la tectonique paléocène-(éocène).

Du point de vue génétique, chronologique et de leur contexte magmatique, les minéralisations de Kadıkalesi nous semblent plutôt devoir être rattachées à la province métallogénique égéenne, miocène, qu'à celle de la ceinture taurique.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre gratitude à Mlle M.-J. Philippe pour son aide dans la réalisation des analyses à la microsonde, à M. P. Zbinden pour l'exécution définitive des dessins et à Mme J. Berthoud pour la dactylographie de notre manuscrit.

Bibliographie

ASLANER, M. (1977): Türkiye Cu-Pb-Zn Yataklarının Jeolojik ve Bölgesel Sınıflaması ile Plaka Tektoniği Yönünden İncelenmesi. K.T.Ü. Yayınları 85, Trabzon.

BERNOULLI, D., P.C. DE GRACIANSKY et O. MONOD (1974): The extension of the Lycian Nappes (SW-Turkey) into the Southeastern Aegean Islands. Eclogae Geol. Helv., 67, 39-90.

GRACIANSKY DE, P.C. (1972): Recherches géologiques dans le Taurus lycien. Thèse Fac. Sc. Univ. Paris-Sud (Orsay) 876, 762 p.

GÜMÜS, A. (1970): Türkiye Metallojenisi, M.T.A. Yayin, 144, Ankara.

HERTEL, L. (1966): Die Fremdelementführung der Bleiglanze als Hilfe zur Bestimmung der Bildungstemperatur. Erzmetall 19, 632 p.

MARMO, V. (1953): On the use of ore minerals in the interpretation of the stage of metamorphism within the amphibolite and the saussurite facies. Norsk. Geol. Tidskr., 32, 136-161.

PISKIN, Ö. (1979): Kadikalesi-Girelbelen (Turgutreis/Mugla) Pb-Zn-Cu Cevherlesmelerinin mineralojik Jenetik Incelemesi. Thèse d'habilitation à la privat-docence. Université d'Egée, Bornova/Izmir.

RAMDOHR, U. (1969): The ore minerals and their intergrowths. Pergamon Press, Oxford, 1169 p.

SAVAŞÇIN, M. Y., BIRSOY, R., DORA, Ö. O. (1979): Batı Anadolu'daki Genc Magmatik Evrime Yeni Yaklasımlar. 33e Congrès de T.J.K. Ankara.

SCHROLL, E. (1955): Über das Vorkommen einiger Spurenmetalle in Blei-Zink-Erzen der Ostalpen. T.M.P. Mitt., 5, 183 p.

TATSUKA, K. and N. MORIMOTO (1973): Comosition variation and polymorphism of tetrahedrite in the Cu-Sb-S system below 400°C. Amer. Mineral., 58, 425-434.

TATSUKA, K. and N. MORIMOTO (1977): Tetrahedrite stability relations in the Cu-Fe-Sb-S system. Amer. Mineral. 62, 1101-1109.

UZKUT, I. (1977): Büyük Menderes-Gediz arasındaki arsenopirit yataklarının olusumu ve altın ve kobalt acısından önemi. Thèse d'habilitation à la privat-docence. Université d'Egée, Bornova/Izmir.

VEEN VAN DER, R. W. (1925): Mineragraphy and ore deposition. The Hague 1, 167 p.

WU, I. J. and R. W. BIRNIE (1977): The bournonite-seligmannite solid solution. Amer. Mineral., 62, 1097-1100.

Manuscrit reçu le 18 juillet 1980.