

PARAGENÈSE DES SULFURES DE CUIVRE DANS LES GISEMENTS DU SHABA (ZAÏRE) : I. KIPUSHI ; II. KAMOTO

F. DIMANCHE (*)

RÉSUMÉ

Des échantillons cuprifères provenant de Kipushi et de Kamoto (corps minéralisé supérieur) ont fait l'objet d'une étude minéralogique détaillée.

Les différents sulfures qui les constituent ont été identifiés par leur microdureté, leur pouvoir réflecteur et leur composition chimique déterminée à la microsonde. Les relations structurales entre ces minéraux ont été analysées au point de vue de la stabilité des assemblages.

A Kipushi, dans des minerais filoniens vraisemblablement modifiés par altération météorique, on a identifié la carrollite, la bornite, la chalcopryrite, la galène, la sphalérite, la tétraédrite, la reniérite, la digénite (ou l'anilite), deux formes de covelline et trois formes de bétékhtinite.

A Kamoto, dans un shale dolomitique qui a subi une altération météorique très faible ou même nulle, on a identifié la chalcosine, deux types de bornite, la digénite (ou l'anilite), une covelline, la pyrite, la carrollite, le leucoxène, le graphite et le zircon.

ABSTRACT

Copper-bearing samples from Kipushi and Kamoto (Upper ore body) were subjected to a detailed mineralogical study.

The different sulfides were identified by their microhardness, their reflecting power and their chemical composition as determined by electron-probe. The textural relations between minerals were analyzed from the point of view of the stability of assemblages.

At Kipushi, in the primary ore probably modified by meteoric alteration, the following minerals were identified: carrollite, bornite, chalcopryrite, galena, sphalerite, tetraedrite, renierite, digenite (or anilite), two types of covellite and three types of betekhtinite.

At Kamoto, in a dolomitic shale which suffered very small or no meteoric alteration, the following minerals were identified: chalcocite, two types of bornite, digenite (or anilite), one covellite, pyrite, carrollite, leucoxene, graphite and zircon.

(*) Institut de Géologie, Université de Liège, Belgique.

PREMIÈRE PARTIE : KIPUSHI

Introduction

Les échantillons dont il va être question proviennent du niveau - 500 m de la mine de Kipushi.

Macroscopiquement, ces minerais sont surtout composés de blende. On y distingue toutefois de nombreuses mouchetures cuprifères.

L'examen microscopique de ces mouchetures a permis d'identifier les espèces suivantes : carrollite, chalcopyrite, bornite, tétraédrite, galène, reniérite, bétékhtinite, digénite, covelline *blaubleibender* et covelline normale.

La présence de briartite et d'idaïte a été, en outre, suspectée à la suite des examens complémentaires effectués au B.R.G.M. (Orléans, France) avec l'aide de MM. R. Caye, J. Padeloup et P. Picot.

La gangue, d'importance réduite, comporte quelques veinules carbonatées, des aiguilles de rutile, des cristaux isolés de quartz pyramidé ainsi que de la shungite en abondance.

Après la présentation des analyses quantitatives (tableaux 1 et 2), les relations structurales entre minéraux seront examinées puis discutées.

APPAREILLAGE ET TECHNIQUES

Les mesures de microdureté ont été effectuées à l'aide d'un microscope Leitz Durimet. Les résultats consignés dans les tableaux 1 et 3 constituent des moyennes de huit à dix mesures. Pour chacune de ces mesures, la longueur des deux diagonales a été prise en considération.

Les mesures de pouvoir réflecteur consignées dans les tableaux 1 et 3 ont été effectuées à l'aide du microphotomètre Leitz MPV I. Le pouvoir réflecteur standard choisi comme référence donnait à 589 microns $R_o = 25,0 \pm 0,5 \%$.

Les données quantitatives sur la composition chimique des minéraux ont été obtenues à l'aide d'une des microsondes Cameca (MS 46) du Centre de Recherches métallurgiques (CRM) à Liège. Suivant le cas, les témoins choisis étaient des métaux purs ou des minéraux naturels (chalcosine, covelline, carrollite, cobaltine, pyrite).

Les résultats consignés dans les tableaux 2 et 4 sont corrigés des effets d'absorption, de nombre atomique et de fluorescence en suivant le programme Da Casa, Tixier (on peut consulter à ce sujet Bury, Leroy, 1970).

Examen minéralographique

On remarquera tout d'abord la texture poreuse du minerai ainsi que l'allure corrodante du minéral le plus abondant — la blende — vis-à-vis des sulfures cuprifères (photo 1).

La CARROLLITE — $Cu_{0,95}Co_{2,01}Ni_{0,06}Fe_{0,01}S_4$ — se rencontre en cristaux dont les plus beaux exemplaires atteignant un millimètre (photo 2). Le minéral est

souvent inclus dans la bornite, parfois dans la blende. La bornite ou même la galène s'observent à l'intérieur des deux réseaux de fractures.

Les mouchetures gris verdâtre de TÉTRAÉDRITE sont irrégulières de forme et le plus souvent isolées dans la blende. On note localement un début d'altération en digénite et *blaubleibender* covelline.

S'il arrive que l'on rencontre la chalcopyrite seule, ou la bornite seule, leur association constitue de loin le cas le plus fréquent.

La BORNITE — $\text{Cu}_{4,98}\text{Pb}_{0,01}\text{Fe}_{1,03}\text{S}_4$ — entoure les plages de chalcopyrite ou se présente à l'intérieur de ces dernières sous la forme de flammes. Sa teinte mauve devient bleue après quelques jours d'exposition à l'air. Cependant, certaines plages de bornite, de teinte orangée, ne s'altèrent pas.

La composition chimique de ce type de bornite est variable. Les teneurs en cuivre se tiennent entre 55 et 60 %, les teneurs en fer entre 12 et 15 %. L'examen à fort grossissement a révélé, dans certains cas favorables, l'existence de fines lamelles de chalcopyrites (de l'ordre du micron) orientées suivant deux directions perpendiculaires. A 45° de ces deux directions, la bornite montre une anisotropie qui pourrait être en liaison avec une cristallisation très fine d'idaïte.

Les deux types de bornite se piquent par place de taches d'allure dendritique (photo 3) constituées de nombreux cristaux tabulaires de covelline normale.

LÉGENDES DES PHOTOGRAPHIES

Les microphotographies ont été réalisées en lumière réfléchie, sous immersion, et lumière simplement polarisée sauf les clichés 9, 10 et 11 réalisés dans l'air.

Liste des abréviations

<i>bt 1</i>	bétékhtinite 1	<i>cl</i>	chlorite
<i>bt 2</i>	bétékhtinite 2	<i>cv</i>	covelline normale
<i>bt 3</i>	bétékhtinite 3	<i>dg</i>	digénite ou anilite
<i>bcv</i>	blaubleibender covelline	<i>gl</i>	galène
<i>bn. m</i>	bornite mauve	<i>lcx</i>	leucoxène
<i>bn. o</i>	bornite orangée	<i>qtz</i>	quartz
<i>cr</i>	carrollite	<i>sp</i>	sphalérite (blende)
<i>cy</i>	chalcopyrite	<i>zr</i>	zircon
<i>cs</i>	chalcosine		

PLANCHE I. — KIPUSHI

PHOTO 1. — *Allure corrodante de la blende vis-à-vis de la bornite (×400).*

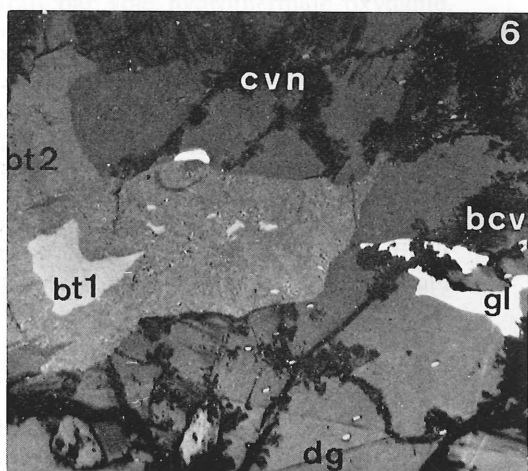
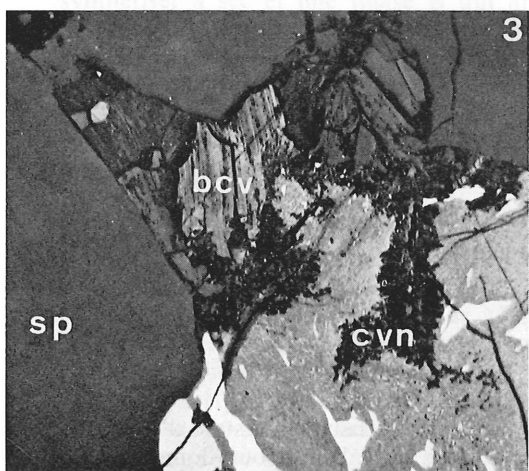
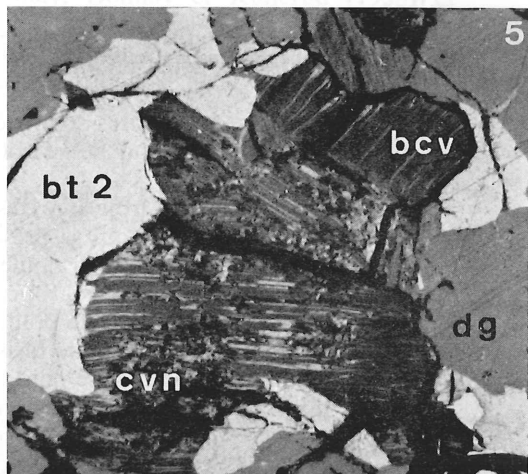
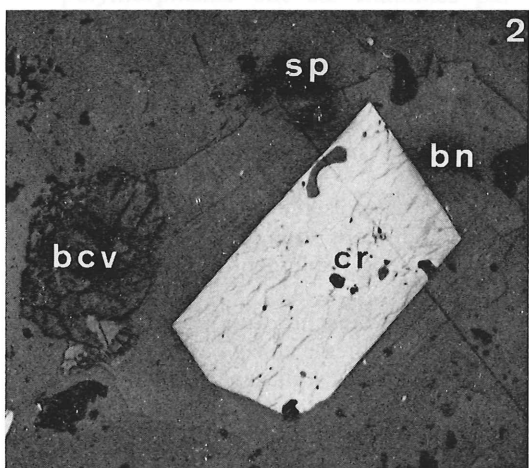
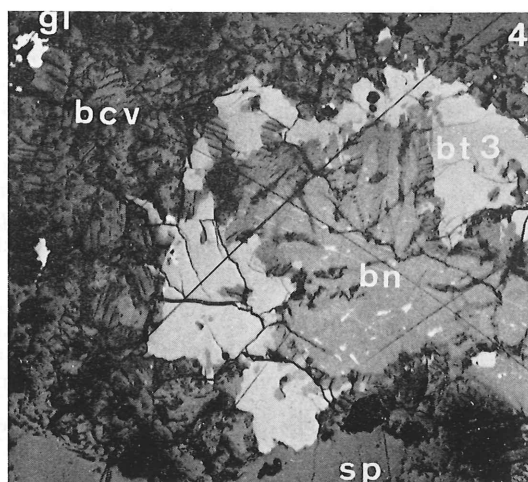
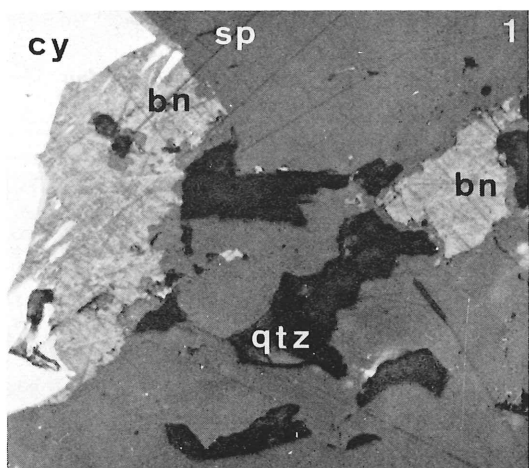
PHOTO 2. — *Cristal de carrollite inclus dans la bornite. La carrollite porte deux réseaux de fractures à l'intérieur desquels on retrouve la bornite (×40).*

PHOTO 3. — *Plage de bornite et chalcopyrite partiellement transformée en covelline. C'est la covelline normale qui se trouve en contact avec la bornite (×400).*

PHOTO 4. — *Plage de bétékhtinite partiellement transformée en digénite, galène et blaubleibender covelline (×80).*

PHOTO 5. — *Plage de bétékhtinite partiellement transformée en digénite et blaubleibender covelline. Ces deux derniers minéraux portent des cristaux de covelline normale (×400).*

PHOTO 6. — *Plage de bétékhtinite 1 incluse dans la bétékhtinite 2. Les deux minéraux sont partiellement transformés en digénite, covellines et galène (×400).*



On relève une nette antipathie structurale entre la bornite mauve et la *blaubleibender* covelline dont les lamelles greffées sur la digénite ne se poursuivent pas jusqu'au contact avec la bornite.

La CHALCOPYRITE montre plus rarement des produits de transformation. Les structures d'association chalcopyrite-digénite-*blaubleibender* covelline sont étroites. Une cristallisation dendritique de covelline normale peut marquer localement les trois minéraux.

La RENIÉRITE — $(\text{Cu}_{2,6} \text{Ge}_{0,4}) (\text{Fe}_{1,0} \text{Zn}_{0,2} \text{Pb}_{0,1}) \text{S}_4$ — se rencontre en grains irréguliers qui accompagnent la bornite ou isolés dans la blende. Le minéral ne donne lieu à aucun produit de transformation.

La BÉTEKHTINITE — $\text{Pb}_2 (\text{Cu}_{20} \text{Fe}) \text{S}_{15}$ — se présente en plages irrégulières qui peuvent atteindre un millimètre. Tous les grains se montrent transformés en une série de sulfures parmi lesquels on reconnaît la digénite, les deux covellines et la galène.

Digénite et *blaubleibender* covelline sont étroitement associées, les deux minéraux sont piqués de petits cristaux de covelline normale à l'instar des plages de bornite (photo 5).

De nombreuses craquelures soulignent les zones transformées et suggèrent que les processus de substitution ne se sont pas effectués sans variations de volume (photos 5 et 6).

On remarquera que les trois analyses de bétékhtinite présentées dans le tableau 3 correspondent à des phases qui se présentent différemment sous le microscope.

La bétékhtinite 1 (photo 6), de couleur blanche, prend facilement le poli et ne se montre que très légèrement anisotrope.

La bétékhtinite 2 (photo 6) se polit difficilement et présente toujours un aspect chagriné. La biréflexance est nette (gris-gris bleuté) de même que l'anisotropie.

La bétékhtinite 3 (photo 4) se polit très bien. Les plages sont généralement fracturées. Le minéral se montre biréfléctant (gris olive-gris bleuté) et anisotrope.

Ces trois phases qui possèdent la composition chimique des bétékhtinites présentent également une dispersivité comparable de leurs pouvoirs réflecteurs (R. Caye, communication verbale).

Remarque sur les caractères optiques de certains minéraux de Kipushi :

Le minéral de type digénite — $\text{Cu}_{1,72}\text{S}$ — vu à Kipushi est coloré en bleu légèrement verdâtre ; il se montre isotrope.

La *blaubleibender* covelline — $\text{Cu}_{1,28}\text{S}$ — montre un pléochroïsme de réflexion très accusé du bleu outremer au jaunâtre. Les sections cycliques se reconnaissent à l'intensité de leur teinte bleue.

La *blaubleibender* covelline reste bleue lorsqu'elle se trouve immergée dans l'huile ; tel n'est pas le cas de la covelline normale dont le spectre d'absorption montre un pic caractéristique dans l'infrarouge proche (Cervelle et Lévy, 1971).

Discussion

A Kipushi comme dans la plupart des gisements de cuivre, un style d'évolution minéralogique élimine le fer des premiers sulfures cristallisés pour donner lieu à

une succession de phases relativement enrichies en cuivre. Les assemblages minéralogiques obtenus présentent des difficultés d'interprétation certaines (Sillitoe et Clark, 1969 ; Cabri, 1973).

Il est évident par ailleurs que l'expérimentation en dessous de 100 °C est rendue très difficile par l'extrême lenteur du cours des réactions. Mais on peut penser que dans la nature la plupart des assemblages minéraux ont pu atteindre un état d'équilibre stable : « ... nonequilibrium associations should generally display textural antipathies » (Bartholomé, 1958).

C'est en gardant à l'esprit cette remarque que l'on passera maintenant en revue les principales associations identifiées au niveau - 500 m.

La DIGÉNITE, regardée comme une chalcosine bleutée — *blue isometric chalcocite*, *blue chalcocite* — discréditée en tant qu'espèce minéralogique puis réintégrée à la suite des travaux de Buerger (1942), fut rebaptisée « néodigénite » par Ramdohr (1969). Ses propriétés cristallographiques ainsi que les problèmes de son polymorphisme ont été examinés par Donnay, Donnay et Kullerud (1958) et Morimoto et Kullerud (1963).

Il faut en réalité distinguer entre la solution solide de type digénite (*sensu* Roseboom, 1966), métastable à la température ordinaire et la digénite naturelle dont la stabilité ne serait assurée que grâce à une teneur en fer un peu inférieure à 1 % en poids (Morimoto, 1970 ; Morimoto et Koto, 1970 ; Morimoto et Gyobu, 1971).

Le minéral de type digénite identifié à Kipushi — $\text{Cu}_{1,725}\text{Fe}_{0,003}\text{S}$ — est trop pauvre en fer (moins de 0,1 % en poids) pour qu'on puisse le situer dans le champ de composition défini par Morimoto et Gyobu (1971) pour les digénites naturelles. La phase pourrait être métastable. Il paraît plus probable que l'on se trouve en réalité en présence de l'anilite : ce minéral que les opérations de polissage transforment en surface en une phase semblable à la digénite (Morimoto, Koto et Shimazaki, 1969 ; Morimoto et Koto, 1970).

La BLAUBLEIBENDER COVELLINE ou *blue remaining covellite* a été synthétisée (Frenzel, 1959, 1961 ; Moh, 1963, 1971) par oxydation de sulfures du type chalcosine. Moh (1971) établit toutefois une distinction entre une phase A que l'on peut synthétiser à sec et une phase B qui apparaît par voie hydrothermale oxydante. Seule, la phase A appartiendrait au système Cu-S ; la phase B, contenant d'autres métaux que le cuivre en solution solide, appartiendrait à des systèmes ternaires, Cu-Fe-S ou Cu-Bi-S.

Rickard (1972) a pu obtenir la *blaubleibender covellite* par réduction hydrothermale de la covellite normale. Il considère le minéral comme un intermédiaire métastable lorsqu'on réduit la covellite normale en chalcosine (ou en djurléite).

Bien entendu, les minéraux naturels qui apparaissent dans les zones d'enrichissement superficiel proviendraient d'une oxydation en phase aqueuse de sulfures comme la chalcosine, la djurléite ou l'anilite. Les minéraux décrits par Sillitoe et Clark (1969) contenant jusqu'à 6,7 % de fer correspondraient à de typiques *blaubleibender covellines* type B de Moh (*op. cit.*).

Deux phases du type *blaubleibender covellite* identifiées à Kipushi ont fait l'objet d'une analyse à la microsonde. La première se développe sur les bétékhtinites, elle est pauvre en fer mais contient 0,3 % de plomb ($\text{Cu}_{1,311}\text{Pb}_{0,002}\text{S}$) ; la seconde se développe sur la bornite et la digénite et contient 1,8 % de fer ($\text{Cu}_{1,26}\text{Fe}_{0,03}\text{S}$).

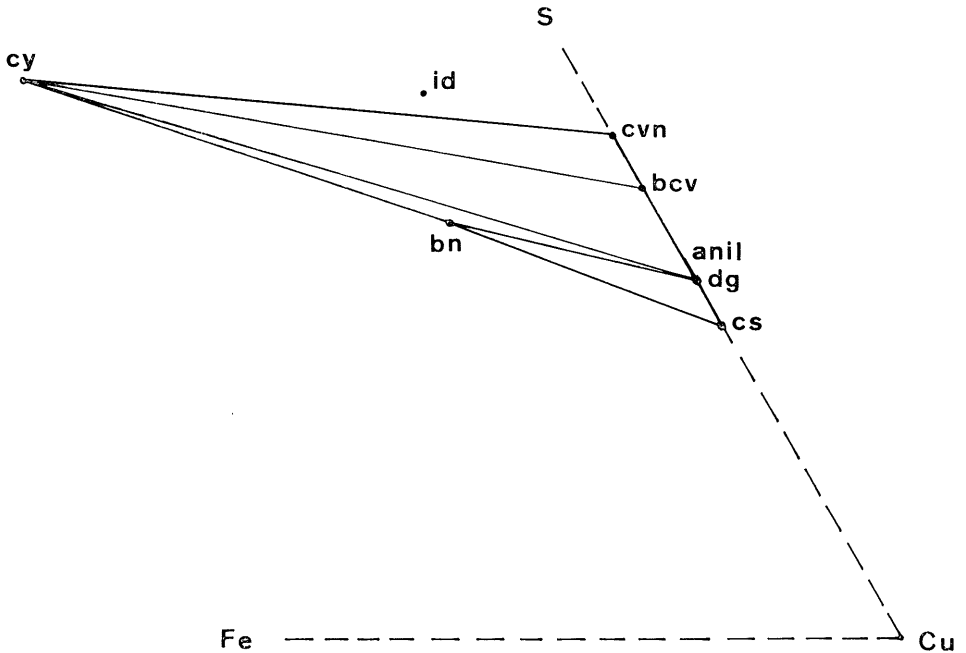


FIG. 1. — Mode d'association des phases de basse température dans la portion riche en cuivre du système Cu—Fe—S. La composition des minéraux représentés (en dehors de l'idaïte) figure dans les tableaux 3 et 6.

Il paraît normal de penser que la *blaubleibender* covelline correspond ici à l'oxydation météorique de la digénite (type B de Moh, *op. cit.*).

La COVELLINE NORMALE parut d'abord posséder la formule stœchiométrique CuS (Kullerud, 1965).

On connaît à présent une série d'analyses (voir Otteman et Frenzel, 1971 ; Clark et Sillitoe, 1971) de covellines normales dans lesquelles on peut constater que le cuivre peut être partiellement substitué par le fer, le plomb ou l'argent. Certains minéraux ont par ailleurs des teneurs en cuivre nettement supérieures au pourcentage stœchiométrique.

Alors que certains considèrent la *blaubleibender* covelline comme une espèce minérale indépendante de la covelline normale (Moh, 1964), d'autres pensent que les deux covellines appartiennent à la même solution solide $\text{CuS-Cu}_{1,45}\text{S}$ (Sillitoe et Clark, 1969).

A Kipushi, plusieurs essais à la microsonde sur des minéraux du type covelline normale ont décelé une teneur en argent variable et pouvant atteindre 2 % en poids. Quant aux teneurs en cuivre, elles atteignent 68 % en poids. On peut donc présenter comme suit la formule de cette covelline argentifère : $\text{Cu}_{1,13}\text{Ag}_{0,02}\text{S}$. Il s'agit d'un composé de transition que l'on peut comparer aux minéraux décrits en 1971 par Otteman et Frenzel (*op. cit.*).

En ce qui concerne les relations structurales entre les deux covellines et l'anilite, on est tenté de considérer comme stables les assemblages anilite-*blaublei-*

S

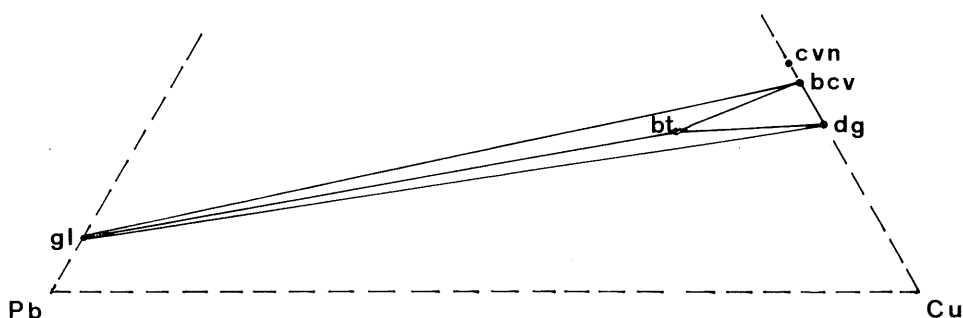


FIG. 2. — Mode d'association des phases de basse température dans le système Cu—Pb—S.

bender covelline et *blaubleibender* covelline-covelline normale. Les contacts entre anilite et covelline normale, compte tenu du diagramme de Moh (*op. cit.*), pourraient correspondre à des assemblages métastables.

Les associations de chalcopryrite et covelline(s) sont habituelles dans les minerais supergènes. Cependant, aucun des diagrammes de phase récemment publiés ne considère ces minéraux comme des paires minéralogiques stables (Barton et Skinner, 1967 ; Morimoto et Gyobu, 1971 ; Stanton, 1972). Cependant, des auteurs comme McKinstry (1959), Bartholomé (1958), Yund et Kullerud (1966), Kullerud (1967) envisageaient avec plus ou moins de réserves l'existence d'un équilibre stable aux températures inférieures à 200 °C.

Frenzel (1958) découvrait un nouveau minéral, l'idaïte : $\text{Cu}_{5,5}\text{FeS}_{6,5}$, exact intermédiaire par la composition (fig. 1) entre la chalcopryrite et la covelline normale. A Kipushi, de nombreux contacts entre chalcopryrite et covelline normale ont été relevés sans que l'on puisse identifier une cristallisation intermédiaire d'idaïte. On verra cependant sur la figure 1 que la composition spécifique de la covelline normale de Kipushi permet d'envisager la stabilité de la paire chalcopryrite-covelline $\text{Cu}_{1,13}\text{S}$.

Les associations entre covellines et bornite Cu_5FeS_4 correspondent-elles à des assemblages minéralogiques stables ? McKinstry (1959) répondait affirmativement, Bartholomé (1962) constatait la rareté de ces associations, Yund et Kullerud (1966) vérifiaient expérimentalement l'instabilité de la paire aux températures supérieures à 200 °C.

A Kipushi, l'antipathie structurale entre bornite et *blaubleibender* covelline est nette, cependant que des contacts occasionnels existent entre bornite et covelline normale.

On verra sur la figure 1 que les assemblages de la bornite avec les deux types de covelline ont été considérés comme métastables.

La BÉTEKHTINITE a été découverte et décrite par Schüller et Wohlmann (1955) ; plusieurs gisements en ont par la suite été signalés. Des données analytiques récentes ont été fournies par Honnorez-Guerstein (1971). Sur le plan expérimental, Craig et Kullerud (1968) ont étudié le système Cu-Pb-S mais les diagrammes de

phase sont tous établis pour des températures supérieures à 200 °C. La bétékhtinite n'a pas été observée parmi les produits des réactions et on peut penser que ce minéral a un champ de stabilité thermique sévèrement limité du côté des hautes températures.

On a dit déjà qu'à Kipushi, la bétékhtinite se présente sous trois aspects dont les compositions chimiques sont très proches. Les structures d'association suggèrent que la bétékhtinite forme des assemblages stables avec l'anilite et la *blaubleibender* covelline plutôt qu'avec la covelline normale.

La figure 2 pourrait constituer une esquisse du diagramme de phases du système Cu-Pb-S valable pour les températures inférieures à 200 °C.

On trouvera dans ce volume (J. Moreau et W. Viaene) d'autres données interprétatives sur les associations des bétékhtinites de Kipushi avec la bornite et la chalcosine.

On voit pour conclure cette première partie que la plupart des associations observées au niveau -500 m peuvent être considérées comme stables.

Les deux associations interprétées comme métastables font intervenir la covelline normale. Cette inertie réactionnelle pourrait être liée à la structure riche en groupe S_2 de ce dernier minéral.

On peut rapprocher de ce comportement, celui de la pyrite, autre minéral caractérisé par ses groupes S_2 , dont il est difficile d'interpréter toutes les associations.

DEUXIÈME PARTIE : KAMOTO

Introduction

Les échantillons de Kamoto analysés ici proviennent du corps minéralisé supérieur. Ce sont des shales dolomitiques lités de couleur gris verdâtre dont les plans de stratification sont soulignés par de nombreux nodules atteignant un centimètre dans leur plus grande dimension (photo 7).

Ces shales dolomitiques ont été décrits par Oosterbosch (1962) et par Bartho-

PLANCHE II. — KAMOTO

PHOTO 7. — *Shale quartzo-dolomitique nodulaire : vue d'ensemble. Côté de la section polie : 20 mm.*

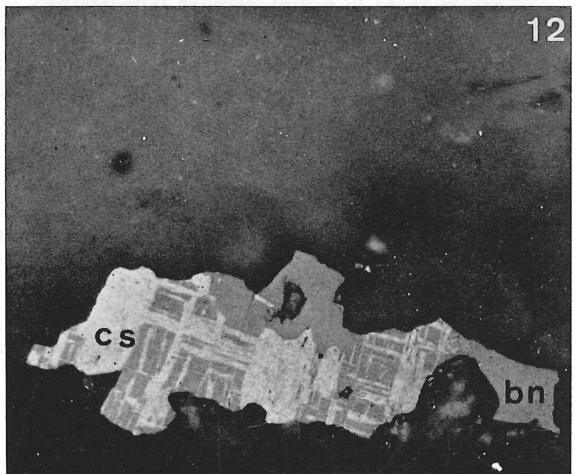
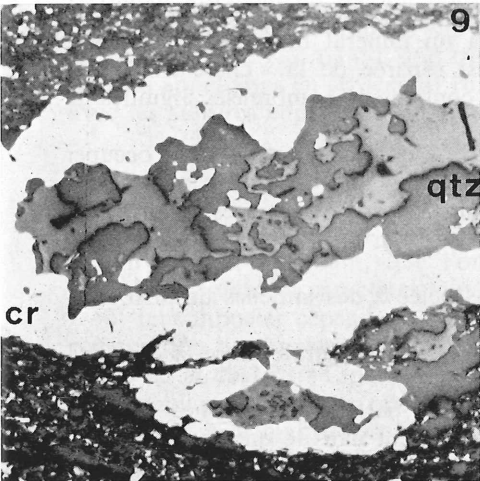
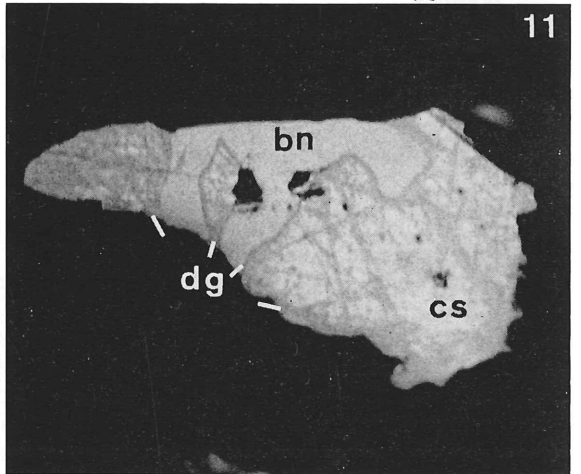
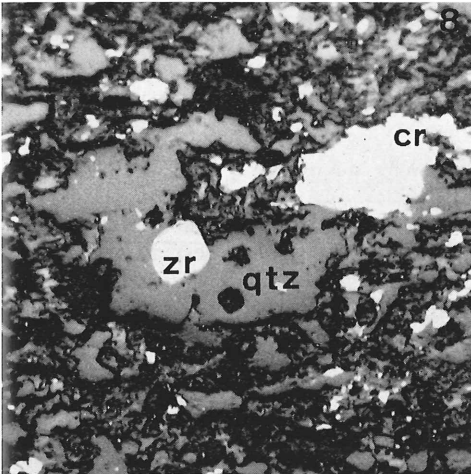
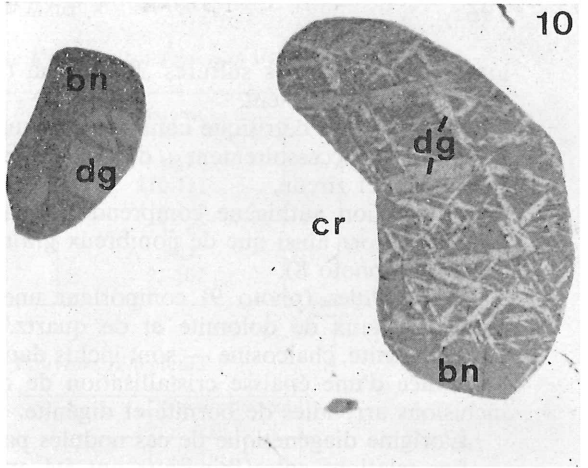
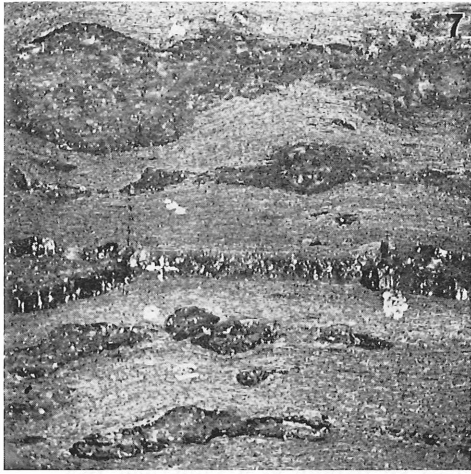
PHOTO 8. — *Shale quartzo-dolomitique : vue de détail montrant le quartz authigène pyritifère et des grains dispersés de sulfures ($\times 260$).*

PHOTO 9. — *Nodule : vue d'ensemble montrant la partie centrale quartzo-dolomitique avec inclusions de carrollite, pyrite et sulfures de cuivre dans le quartz. La couronne de carrollite contient elle aussi des inclusions de sulfures. Dimension du nodule complet : 2 mm.*

PHOTO 10. — *Grains arrondis de bornite et digénite inclus dans la couronne de carrollite. Les plages de digénite paraissent occuper les plans III de la bornite ($\times 520$).*

PHOTO 11. — *Grain de bornite du shale : la bornite paraît s'y transformer en digénite puis en chalcosine. La plage résiduelle de bornite est séparée de la chalcosine par un liséré continu de digénite (ou d'anilite) ($\times 800$).*

PHOTO 12. — *Partie centrale d'un nodule : grain de bornite inclus dans le quartz. La bornite paraît se transformer en chalcosine sans passer par l'intermédiaire de l'anilite. La chalcosine paraît occuper les plans 001 de la bornite ($\times 400$).*



lomé (1962) pour les sulfures. Katekesha (1970) et Bartholomé *et al.* (1973) les mentionnent également.

Leur fraction détritique comporte du quartz, des illites, de la chlorite verte, du fer titané et accessoirement : des paillettes de graphite ainsi que des grains de tourmaline et zircon.

La fraction authigène comprend le quartz, la dolomite, une chlorite magnésienne incolore ainsi que de nombreux grains dispersés de sulfures de cuivre et/ou de cobalt (photo 8).

Les nodules (photo 9) comportent une partie centrale où l'on reconnaît de grands cristaux de dolomite et de quartz. Des grains de sulfures — carrollite, pyrite, bornite, chalcosine — sont inclus dans ce quartz. La bordure des nodules est constituée d'une épaisse cristallisation de carrollite où on relève de nombreuses inclusions arrondies de bornite et digénite.

L'origine diagénétique de ces nodules paraît très probable (Katekesha, 1974).

Les relations entre minéraux ont été examinées en dehors et à l'intérieur des nodules.

Les considérations structurales sont accompagnées d'une série de données quantitatives consignées dans les tableaux 3 et 4.

Examen minéralographique

Comme à Kipushi, deux types de BORNITE sont à distinguer : une première bornite, de couleur rosée à l'état frais, vire au mauve lorsqu'elle est mise en contact avec l'air. Une deuxième bornite, de couleur orangée reste identique à elle-même après un contact prolongé avec l'air (photo 15).

Contrairement à celle de Kipushi, la bornite orangée de Kamoto ne montre ni les inclusions fines de chalcopyrite ni l'anisotropie.

On note sur de nombreux grains, l'association de la bornite avec un minéral bleu de type DIGÉNITE. Dans certains cas, la répartition spatiale des deux minéraux ne paraît répondre à aucune loi. Dans d'autres cas, au contraire, les plages de digénite occupent les plans 111 de la bornite, suivant une structure d'assemblage qui suggère le remplacement (succession), ou l'exsolution (simultanéité).

Bornite et « digénite » peuvent s'associer à un minéral blanc bleuté de type chalcosine. La bornite en plages découpées est séparée de la « chalcosine » par un liséré de digénite (photo 11). La chalcosine contient de nombreuses aiguilles de digénite.

Ailleurs, la bornite est en contact direct avec la chalcosine qui semble occuper ses plans 001 (photo 12).

Les grains entièrement composés de digénite ne sont pas rares. Il n'en est pas de même pour la chalcosine qui est rarement dépourvue d'inclusions de bornite ou de digénite.

Exceptionnellement, la digénite se trouve associée à des lamelles de BLAUBLEIBENDER COVELLINE (photo 13).

On relève, comme à Kipushi, une nette antipathie structurale entre la *blaubleibender covelline* et la bornite.

On notera la présence de la PYRITE en granules parfois idiomorphes que l'on rencontre dans les minéraux authigènes et spécialement dans le quartz (photo 14).

La chlorite magnésienne incolore signalée par Bartholomé *et al.* (1973) se

TABLEAU 4. — *Minéraux de Kamoto. Microdureté Vickers*

Minéral	Poids appliqué	Mesures	Moyenne
<i>Blaubleibender</i> covellite	ND	ND	ND
Bornite mauve	50	110-121	116
Bornite orangée	50	117-125	122
Digénite (bornite)	25	75- 85	78
Digénite (carrollite)	25	ND	ND
Chalcosine	50	93-102	97

TABLEAU 5. — *Pouvoirs réflecteurs*

Minéral	Pouvoir réflecteur en %
<i>Blaubleibender</i> covellite	ND
Bornite mauve	21,5
Bornite orangée	26,0
Digénite (bornite)	20,7
Digénite (carrollite)	ND
Chalcosine	29,5

TABLEAU 6. — *Composition chimique des minéraux de Kamoto ; pourcentages en poids*

Minéral	Cu	Fe	Ni	Co	S	Total
<i>Blaubleibender</i> covellite	70,2	0,6	—	—	27,1	97,9
Bornite mauve	63,6	11,7	—	—	27,1	102,4
Bornite	63,6	11,6	—	—	25,9	101,1
Digénite (bornite)	77,6	0,06	0,02	—	23,1	100,8
Digénite (carrollite)	77,0	0,03	—	0,3	23,3	100,6
Chalcosine	78,9	0,04	—	—	19,8	98,8

reconnait aisément en section polie (photo 15). Ses grandes lamelles courbes se rencontrent fréquemment dans le voisinage des sulfures de cuivre.

Les grains de FER TITANÉ sont très abondants ; ils appartiennent tous aux formes les plus appauvries en fer (photo 16, Dimanche, 1972) et sont en association étroite avec les sulfures cuprifères (photo 15).

Discussion

Un minéral abondant, que l'on n'a pas rencontré dans les paragenèses de Kipushi, présente les caractères minéralogiques de la CHALCOSINE.

Il faut rappeler cependant, que depuis Djurle (1958), on connaît une phase de composition non stœchiométrique — $\text{Cu}_{1,96}\text{S}$ — qui présente toutes les caractéristiques de la chalcosine lorsqu'on l'examine en lumière réfléchie.

Une plage importante sélectionnée à l'intérieur d'un nodule a fait l'objet d'une vérification à la microsonde. Sa composition chimique — $\text{Cu}_{2,01}\text{S}$ — correspond bien à celle de la chalcosine.

Il n'est pas exclu toutefois que certaines plages blanches qui prennent difficilement le poli parmi les petits grains de sulfure disséminés dans les shales ne soient en réalité de la DJURLÉITE. Malheureusement, la petite taille des grains et l'abondance d'inclusions ont rendu toute analyse impossible.

Deux grains présentant les caractères optiques de la DIGÉNITE ont fait l'objet d'une analyse à la microsonde. La première phase, de composition $\text{Cu}_{1,69}\text{S}$, est associée à la bornite. La seconde, de composition $\text{Cu}_{1,67}\text{Co}_{0,01}\text{S}$, est associée à la carrollite. Toutes deux se montrent relativement pauvres en cuivre et pratiquement dépourvues de fer. Comme à Kipushi, on présume que ces deux minéraux sont en réalité de l'ANILITE.

Une des rares plages de BLAUBLEIBENDER COVELLINE rencontrées dans les shales nodulaires a été analysée à la microsonde.

Sa composition chimique — $\text{Cu}_{1,31}\text{Fe}_{0,01}\text{S}$ — est très semblable à celle des minéraux analysés à Kipushi (*blaubleibender* covelline type B de Moh, 1971).

La stabilité de son association avec l'anilite ne paraît faire aucun doute ; son antipathie structurale pour la bornite avait déjà été relevée à Kipushi.

Les deux BORNITES identifiées à Kamoto ne se différencient que par la couleur et le pouvoir réflecteur. Il pourrait s'agir là de deux espèces cristallographiquement distinctes (Morimoto et Kullerud, 1961). Ces bornites sont en contact habituel avec la chalcosine et l'anilite. Ces différentes constatations ont été reportées sur la figure 1 qui concernera à la fois les gisements de Kipushi et de Kamoto.

Interprétation

En concluant cette seconde partie, il est permis de penser que divers événements se sont succédé au cours de la diagenèse des shales examinés.

Après une précipitation initiale de pyrite finement cristallisée, l'enrichissement ultérieur des eaux nourricières en cuivre et en cobalt a rendu instable cette pyrite. Certains grains sont restés protégés à l'intérieur des minéraux authigènes.

Le milieu demeurant réducteur, le fer a été extrait des grains détritiques de fer titané pour être immédiatement fixé dans le réseau de sulfures de fer, cuivre et cobalt (voir à ce sujet Cailteux et Dimanche, 1974). Le fer continue à quitter le

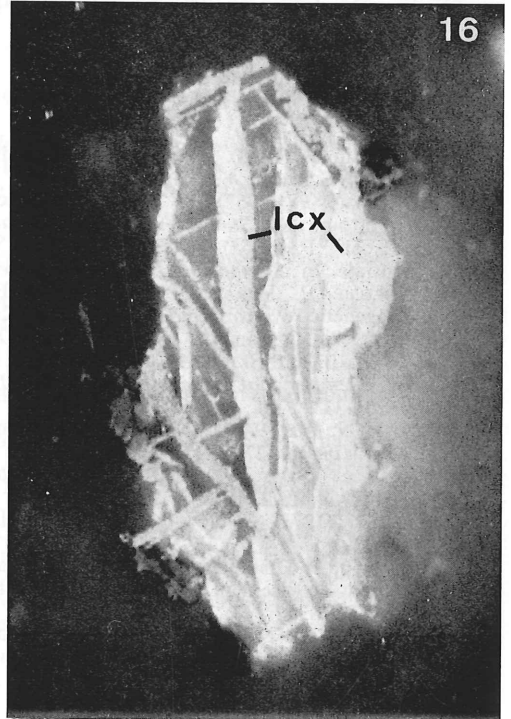
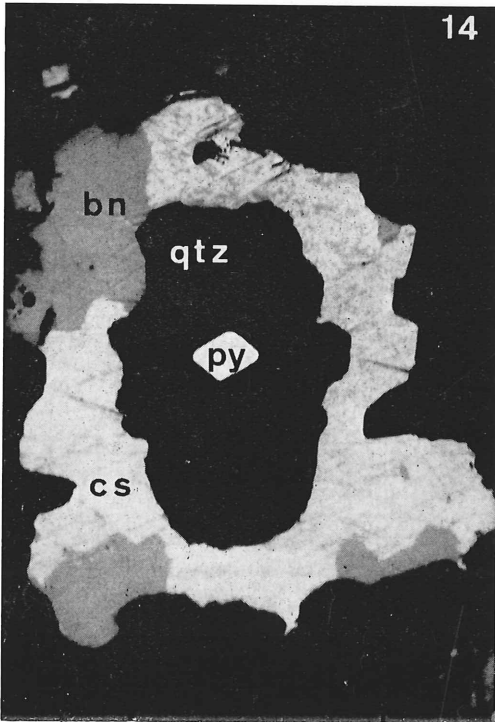
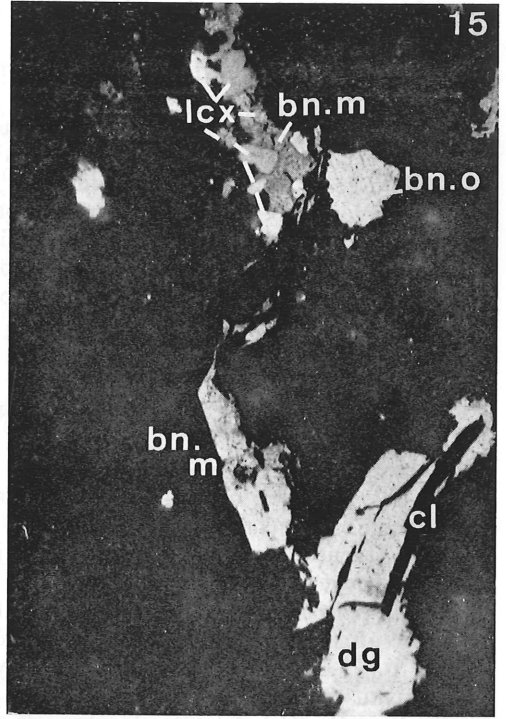
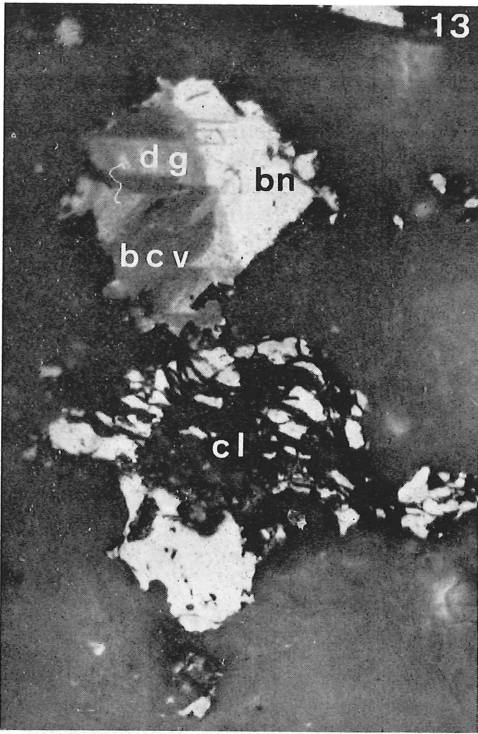
PLANCHE III. — KAMOTO

PHOTO 13. — *Shale quartzo-dolomitique ; grain de bornite, anilite et blaubleibender covelline accompagné de nombreuses paillettes de chlorite incolore. L'anilite sépare la covelline de la bornite ($\times 720$).*

PHOTO 14. — *Partie centrale d'un nodule : cristal idiomorphe de pyrite inclus dans le quartz ($\times 560$).*

PHOTO 15. — *Shale quartzo-dolomitique : association étroite des grains de sulfure et de leucoxène. On remarquera la grande paillette courbe de chlorite incolore (cl) incluse dans un grain d'anilite. Les deux types de bornite sont observés simultanément ; c'est la bornite mauve (bn. m) qui est accompagnée de leucoxène ($\times 600$).*

PHOTO 16. — *Shale quartzo-dolomitique : grain isolé de leucoxène. Il s'agissait probablement d'un grain déritique de magnétite porteur d'exsolutions d'ilménite dans ses plans 111. Au cours de la diagenèse, la magnétite s'est trouvée mobilisée cependant que les exsolutions d'ilménite s'appauvrissaient considérablement en fer ($\times 1\ 000$).*



milieu et les sulfures de fer se transforment en *blaubleibender* covelline, digénite et finalement en chalcosine.

On peut concevoir la genèse des nodules par voie centripète ou au contraire centrifuge. Des bulles dispersées dans les shales peuvent s'être progressivement cristallisées à la façon des géodes, de l'extérieur vers l'intérieur. L'interprétation inverse fait appel à une recristallisation du quartz et de la dolomite suivie d'une épaisse croûte de carrollite entourant le nodule ainsi défini.

On ne peut que remarquer la conformité d'ensemble du schéma ci-dessus avec les idées développées successivement par Bartholomé (1962, 1963) et Bartholomé *et al.* (1973).

REMERCIEMENTS

Les analyses chimique à la microsonde ont été effectuées au Centre de Recherches métallurgiques, à Liège. Je désire y remercier chaleureusement M. Vincent Leroy, chef de Service adjoint ainsi que les ingénieurs de recherche, MM. Breyer et Lehnert.

Le polissage des échantillons et les travaux de photographie ont pu être réalisés grâce aux savoir-faire de MM. R. Vandenvinne et M. Gaspar.

M. P. Evrard, F. Katekesha et J. Moreau ont accepté de lire puis de discuter le manuscrit.

Paul Bartholomé est intervenu efficacement à tous les stades de réalisation du travail entrepris.

Bibliographie

- BARTHOLOMÉ, P. (1958). — On the paragenesis of copper ores. *Studia Universitatis Lovanium*, fac. des Sciences, 4, p. 5-31.
- BARTHOLOMÉ, P. (1962). — Les minerais cuprocobaltifères de Kamoto (Katanga Ouest). I: Pétrographie. *Studia Universitatis Lovanium*, fac. des Sciences, 14, p. 3-40.
- BARTHOLOMÉ, P. (1963). — Sur la zonalité dans les gisements du Copperbelt de l'Afrique centrale. In: *Symposium (Prague): Problems of Postmagmatic Ore Deposition*, p. 317-321.
- BARTHOLOMÉ, P., EVRARD, P., KATEKESHA, F., LOPEZ-RUIZ, J. and NGONGO, M. (1973). — Diagenetic ore-forming processes at Kamoto, Katanga, Republic of the Congo. In: G. C. Amstutz and A. J. Bernard, eds., *Ore in Sediments*. Springer-Verlag, Berlin, p. 21-41.
- BARTON, P. B. and SKINNER, B. J. (1967). — Sulfide mineral stabilities. In: H. L. Barnes, ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*. Holt Rinehart Winston, New York, p. 236-333.
- BUERGER, N. W. (1942). — X-ray evidence for the existence of the mineral Digenite, Cu_9S_5 . *Am. Mineral.*, 27, p. 712-716.
- BURY, G. et LEROY, V. (1970). — *La microanalyse par sonde électronique*. C.R.M., Liège, MP 14/69 MS 2, 56 p.
- CABRI, L. J. (1973). — New data on phase relations in the Cu-Fe-S system. *Econ. Geol.*, 68, 4, p. 443-455.
- CAILTEUX, J. et DIMANCHE, F. (1974). — Examen des oxydes de fer et titane dans l'environnement du gisement de cuivre de Musoshi (Shaba, Zaïre). *Bull. Soc. franç. Min. Cristall.*, 96, p. 378-382.
- CERVELLE, B. D. et LÉVY, C. (1971). — Propriétés optiques de la covelline et de l'énergite dans le visible et dans l'infrarouge proche. *Bull. Soc. franç. Min. Cristall.*, 94, p. 146-155.
- CLARK, A. H. et SILLITOE, R. H. (1971). — A note on iron-bearing normal covellite. *N. Jb. Miner. Mh.*, p. 424-428.

- CRAIG, J. R. et KULLERUD, G. (1968). — Phase relations and mineral assemblages in the copper-lead-sulfur system. *Am. Mineral.*, 53, p. 145-161.
- DIMANCHE, F. (1972). — Evolution minéralogique de quelques sables titanifères d'Afrique du Sud. *Ann. Soc. Géol. de Belgique*, 95, p. 183-190.
- DIURLE, S. (1958). — An X-ray study in the Cu-S system. *Acta chem. Scand.*, 12, p. 1415-1416.
- DONNAY, G., DONNAY, J. D. H. and KULLERUD, G. (1958). — The crystal and twin structure of digenite Cu_9S_5 . *Am. Mineral.*, 43, p. 228-242.
- FRENZEL, G. (1958). — Ein neues Mineral: Idait. *N. Jb. Miner. Mh.*, 6, p. 142.
- FRENZEL, G. (1959). — Idait und « blaubleibender Covellin ». *N. Jb. Miner. Mh.*, 93, p. 87-132.
- FRENZEL, G. (1961). — Der Cu-Überschuß des blaubleibender Covellin. *N. Jb. Miner. Mh.*, 9, p. 199-204.
- HONNOREZ-GUERSTEIN, B. M. (1971). — Betekhtinite and Bi-sulfosalts from the copper-mine of "La Leona" (Argentina). *Mineralium Deposita*, 6, p. 111-121.
- KATEKESHA, F. (1970). — Le corps minéralisé supérieur de Kamoto. Mémoire de Licence inédit, Fac. des Sci., Univ. de Liège, 60 p.
- KATEKESHA, F. (1974). — La minéralisation cupro-cobaltifère de Kamoto (en préparation).
- KULLERUD, G. (1965). — Covellite stability relations in the Cu-S system. *Freiberg. Forsch.*, C 186, p. 145-160.
- KULLERUD, G. (1967). — Sulfide studies. In: P. Abelson, ed., *Researches in Geochemistry*, Vol. 2. Wiley, New York, 663 p.
- McKINSTRY, H. (1959). — Mineral assemblages in sulfide ores: the system Cu-Fe-S-O. *Econ. Geol.*, 54, p. 975-1001.
- MOH, G. H. (1964). — Blaubleibender Covellite. *Carnegie Inst. Washington Year Book*, 63, p. 208-209.
- MOH, G. H. (1971). — Blue remaining covellite and its relations to phase in the sulfur rich portion of the copper-sulfur system at low temperature. *Mineral. Soc. Japan, Sp. Paper*, 1, p. 226-232.
- MORIMOTO, N. (1970). — Crystal-chemical studies of the Cu-Fe-S system. In: T. Tatsumi, ed., *Volcanism and Ore Genesis in Japan*. University of Tokyo Press, 448 p.
- MORIMOTO, N. and KULLERUD, G. (1961). — Polymorphism in bornite. *Am. Mineral.*, 46, p. 1270-1282.
- MORIMOTO, N. and KULLERUD, G. (1963). — Polymorphism in Digenite. *Am. Mineral.*, 48, p. 110-123.
- MORIMOTO, N. and KULLERUD, G. (1965). — Polymorphism on the Cu_5FeS_4 - Cu_9S_5 join. *Z. Kristallogr.*, 123, p. 235-254.
- MORIMOTO, N., KOTO, K. and SHIMAZAKI, Y. (1969). — Anilite, Cu_7S_4 , a new mineral. *Am. Mineral.*, 54, p. 1256-1268.
- MORIMOTO, N. and KOTO, K. (1970). — Phase relations of the Cu-S system at low temperatures, stability of anilite. *Am. Mineral.*, 55, p. 106-117.
- MORIMOTO, N. and GYOBU, A. (1971). — The composition and stability of digenite. *Am. Mineral.*, 56, p. 1889-1909.
- OOSTERBOSCH, R. (1962). — Les minéralisations dans le système du Roan au Katanga. In : P. Nicolini, éd., *Gisements stratiformes de cuivre en Afrique*, première partie. Association des Services géologiques africains, 211 p.
- OTTEMAN, J. und FRENZEL, G. (1971). — Neue Mikrosonden-Untersuchungen an Idait, Covellin und blaubleibender Covellin. *N. Jb. Miner. Mh.*, 2, p. 80-89.
- RAMDOHR, P. (1969). — *The Ore Minerals and their Intergrowths*. Pergamon Press, London, 1174 p.
- RICKARD, D. T. (1972). — Covellite formation in low temperature aqueous solutions. *Mineralium Deposita*, 7, p. 180-188.
- ROSEBOOM, E. H. (1966). — An investigation of the system Cu-S and some natural copper sulfides between 25 and 700 °C. *Econ. Geol.*, 61, p. 641-672.
- SCHÜLLER, A. und WOHLMANN, E. (1955). — Betehtinit, ein neues Blei-Kupfer-Sulfid aus den Mansfelder Rücken. *Geologie*, 4, p. 535-555.
- SILLITOE, R. H. and CLARK, A. H. (1969). — Copper and copper-iron sulfides as the initial products of supergene oxydation, Copiapo mining district, Northern Chili. *Am. Mineral.*, 54, p. 1684-1710.
- STANTON, R. L. (1971). — *Ore Petrology*. McGraw-Hill, New York, 713 p.
- YUND, R. A. and KULLERUD, G. (1966). — Thermal stability of assemblages in the Cu-Fe-S system. *Jour. Petrology*, 7, p. 454-488.

