

LES GISEMENTS DE SCHISTES, MARNES ET GRÈS CUPRIFÈRES

L. GUILLOUX et H. PÉLISSONNIER (*)

RÉSUMÉ

Les gisements stratiformes de schistes et marnes cuprifères accompagnent certaines transgressions correspondant à des bassins en communication intermittente avec la mer ; ils sont ordonnés autour de paléoreliefs et localisés dans des niveaux à faciès réducteur au premier passage important de la sédimentation gréseuse à la sédimentation carbonatée.

Leur importance est grande puisque, avec les grès cuprifères, ils représentent 160 millions de tonnes de cuivre métal, soit environ 30 % de l'ensemble du tonnage métal des gisements de cuivre, à la teneur moyenne très élevée de 2,4 %. Mais leurs caractéristiques dimensionnelles sont très dispersées et leur spectre géochimique, à caractère plutôt sidérophile, marqué par le cobalt, est à la fois très large et susceptible de grandes variations.

Outre leurs zonalités minéralogiques internes, les gisements de schistes et marnes cuprifères passent latéralement ou verticalement à des gisements en milieu gréseux et à des minéralisations discordantes dans les séries transgressives ou dans les socles sous-jacents. Les mêmes séries renferment des occurrences minéralisées en U, Mn, Pb, Zn, dont les richesses paraissent s'exclure réciproquement.

Si leur dépôt est clairement syngénétique, l'origine des métaux qui les constituent est envisagée par un lessivage souterrain du socle sous-jacent, lessivage canalisé par des hauts-fonds *avant leur fermeture synsédimentaire*. L'homogénéité des caractéristiques géologiques trouve sa justification dans ce dispositif particulier d'alimentation ; l'hétérogénéité dans les dimensions et les spectres géochimiques trouve son explication dans la diversité des socles lessivés.

ABSTRACT

The cupriferous schist and argillaceous limestone stratiform ore deposits are related to certain transgressions that correspond to basins communicating intermittently with the sea. They are set out around paleoreliefs and located in reducing facies stratas at the first passage of the silt sedimentation to the carbonate sedimentation.

Their economic importance is very high. It represents, together with the Red Bed type cupriferous sandstones, 160 millions tons of metal, that is to say, 30 % of the total metal contained in the copper deposits of the world. They have a very high average grade: 2.4 % Cu. But their dimensional characteristics are very scattered and their siderophile geochemical content, which is marked by cobalt, is both very wide and variable.

In addition to their internal mineralogical zoning, the cupriferous schists and argillaceous limestones pass laterally or vertically to ore deposits in sandstone environment and to dis-

(*) Centre de Géologie minière, Ecole nationale supérieure des Mines de Paris.

cordant mineralizations in the transgressive series or in the basement. These series contain occurrences mineralized in U, Mn, Pb, Zn, but high values in these elements never occur together.

If their formation is clearly syngenetic, their elements originate from underground leaching of the basement. This leaching is channelled by submarine hills *before their burial by sediments*. The homogeneity of the geological characteristics is explained by this particular type of feeding: the heterogeneity in the size and geochemical contents is explained by the diversity of the leached basements.

INTRODUCTION : UNITÉ DU SUJET. GISEMENTS SOUMIS À L'ÉTUDE

Dans une métallogénie encore très naturaliste, pour mettre en évidence les facteurs essentiels à la formation d'une concentration minérale, il est fondamental d'opérer d'abord par comparaison et donc de prendre en compte *le plus grand nombre possible* de gisements résultant d'un *même* processus de formation. Malheureusement, le processus de formation reste encore, dans la plupart des cas, assez mystérieux et force nous est de faire une sélection aussi homogène que possible à partir de critères empiriques d'observation, en restant attentif aux catégories laissées de côté et aux problèmes de frontières souvent riches de significations.

Parmi les gisements stratiformes de cuivre, les métallogénistes ont l'habitude de distinguer essentiellement trois types :

— les amas pyriteux associés à des roches volcaniques auxquels on peut rattacher les kurokos définis au Japon. Hutchinson (1973) a présenté récemment une synthèse de ce type qu'il subdivise en trois sous-types :

- les schistes et marnes cuprifères (*Kupferschiefer* et *Kupfermergel*) ;
- les grès cuprifères (*Red beds*).

Jusqu'à la découverte des districts d'Udokan (U.R.S.S.) et de Lubin (Pologne), les grès cuprifères paraissaient n'avoir guère d'importance économique. Or, à l'exception des districts de Corocoro, d'Udokan et peut-être du Djezkazgan, ils sont toujours associés spatialement à des schistes et marnes cuprifères. Dans beaucoup de districts, notamment à Lubin et en Zambie, cette liaison est même extrêmement étroite sans aucune discontinuité spatiale. Pour cette raison, l'étude des grès cuprifères ne peut être dissociée de celle des schistes et marnes cuprifères. Mais ce sont essentiellement les différents gisements de schistes et marnes cuprifères du monde qui s'imposent à l'observateur comme constituant une entité géologique. Celle-ci apparaît :

— à l'échelle de l'affleurement : les minéralisations sont toujours localisées dans une série transgressive sur une discontinuité de sédimentation et sont parfaitement concordantes sur la stratification ;

— à l'échelle de l'échantillon : la minéralisation est particulièrement fine — au point que l'on a souvent du mal à distinguer les sulfures à l'œil nu — dans une roche à grain fin de couleur gris à noir, argilo-marno-silteuse, souvent finement varvée.

Bref, il y a un air de famille indubitable.

Comme le rappelle Garlick (1972), Schneiderhöhn, en 1932, après une semaine seulement passée en Zambie n'hésitait pas à assimiler les dépôts de la Copperbelt

à ceux du Mansfeld. P. Bartholomé (1969) relie White Pine aux gisements shabiens. Le district de Lubin en Basse-Silésie polonaise est relié stratigraphiquement au Mansfeld ; de même les gisements du Shaba se relient aux gisements zambiens.

Avec les critères qui viennent d'être donnés, les principaux gisements exploités ou susceptibles de l'être dont nous cherchons à mettre en évidence les caractères communs se répartissent ainsi :

— gisements stratiformes du Shaba et du nord de la Zambie : districts de Kolwezi, Fungurumé, Likasi, Lubumbashi (Zaïre), districts de Mufulira, Bwana Mkubwa, Roan Muliashi, Kitwe, Bancroft, N'Changa (Zambie) ;

- gisements du Zechstein allemand et polonais :
 - district de Richelsdorf (R.F.A.) ;
 - districts de Mansfeld et Sangerhausen (R.D.A.) ;
 - districts de Boleslawiec et de Lubin (Pologne) ;
- district de White Pine (Michigan, Etats-Unis) ;
- district de Udokan (Sibérie orientale, U.R.S.S.) ;
- district du Djezkazgan (Kazakstan, U.R.S.S.) ;
- district de Mount Isa (Queensland, Australie) ;
- district du Boléo (Basse-Californie, Mexique) ;
- districts de Timna (Israël) et Wadi Araba (Jordanie) ;
- district de Lomagundi (Rhodésie) ;
- district de Corocoro (Bolivie).

A cette liste, nous pouvons ajouter la partie encaissée dans les roches sédimentaires du nouveau district de Coppermine River, Mackenzie, Canada.

Il faut encore mentionner les occurrences exploitables de l'Anti-Atlas et du Haut-Atlas du Maroc ; de la bordure crétacée de la côte africaine en Angola et au Gabon ; du plateau du Colorado (Etats-Unis).

On notera en outre que des anomalies géochimiques en cuivre non exploitables sont signalées dans des contextes géologiques analogues en de très nombreuses régions du monde.

Nous allons maintenant passer en revue les principaux caractères de ces gisements en examinant successivement selon une division un peu arbitraire :

— le *contenant*, c'est-à-dire l'enveloppe des gisements, de manière à faire ressortir les principales relations des gisements avec leur cadre géologique à toutes les échelles : ces relations seront analysées plus particulièrement pour les gisements dans les schistes et marnes qui forment *a priori* une entité bien définie ;

— le *contenu*, c'est-à-dire le minerai avec ses caractéristiques dimensionnelles et chimico-minéralogiques.

Ensuite seront passées en revue les minéralisations associées, à commencer par les gisements dans les grès.

En conclusion, ayant pris conscience à la fois de l'unité du type et des limites de cette unité, nous chercherons un modèle de genèse qui puisse s'adapter aux différentes relations mises en évidence.

L'ENVELOPPE DES GISEMENTS DE SCHISTES ET MARNES CUPRIFÈRES

Relation avec la sédimentation

Transgression

1. Le changement brutal de sédimentation correspond en règle générale au passage de grès à shales et de shales à carbonates essentiellement dolomitiques (cependant, à Wadi Araba, c'est le passage inverse, de dolomie à grès) ; en même temps passage d'un milieu oxydant rouge à un milieu réducteur gris, noir ou vert (cf. règle de Nicolini, 1962). Ce changement brutal peut être interprété comme un pas en avant de la transgression, puisqu'il correspond à un approfondissement du bassin (Péligonniier, 1965) ; la minéralisation s'inscrit donc localement dans la sédimentation à une époque très précise. Soulignons encore cette *concordance sur la stratification* tout à fait exceptionnelle pour des gîtes minéraux.

2. Cependant, à une échelle plus large, on voit la minéralisation suivre la transgression. Dans un même district, les niveaux minéralisés ne sont pas synchrones, mais accompagnent le biseau transgressif : c'est le premier changement lithologique d'une certaine importance au-dessus de la discordance qui porte localement la minéralisation cuprifère principale.

Cette observation capitale est difficile à faire ; elle nécessite soit des repères chronostratigraphiques très précis, soit des conditions d'affleurement exceptionnelles montrant le relais des couches. De plus, elle n'apparaît que très difficilement pour des paléogéographies à fond très plat — comme celle du Zechstein de l'Europe centrale — qui n'induisent pas de biseaux nets.

Nous l'avons faite pour la transgression infracambrienne dans l'Anti-Atlas marocain à deux échelles : d'une part dans la partie occidentale, transversalement à la chaîne, les concentrations passent du niveau sous le « petit calcaire » (Amadous, Alous) au niveau dit de Talate n'Ouamane (Tizert, Tiferki...) sous la dolomie de Tamjout (fig. 1). D'autre part, longitudinalement, la transgression infracambrienne se développe d'ouest en est, de l'Adoudounien inférieur au Géorgien, sur plusieurs centaines de kilomètres : les indices cuprifères stratiformes se trouvent au Géorgien à l'est, comme à l'Adoudounien à l'ouest, sous le premier horizon carbonaté au passage de la sédimentation détritique grossière rouge à la sédimentation détritico fine grise à noire.

Des observations comparables ont été faites dans le Zechstein de l'Europe centrale. A l'échelle de l'ensemble du bassin, Wedepohl (1964) note que les marnes bitumineuses minéralisées de Gröditz et Haasel (dénomination polonaise Grodziec et Złotoryja) en Basse-Silésie se sont déposées *plus haut stratigraphiquement* que les schistes cuprifères de l'Allemagne nord-occidentale, à une dizaine de kilomètres de la limite extrême de la transgression du Zechstein.

Dans le détail, les marnes bitumineuses cuprifères de ce district apparaissent tantôt au-dessus, tantôt en dessous d'un repère chronostratigraphique très sûr à *Productus* ; elles sont toujours au-dessus d'un faciès rouge discordant sur les isochrones (Konstantynowicz, 1973).

Paléoreliefs

Les concentrations sont associées à des irrégularités du substratum, plus précisément à des hauts-fonds.

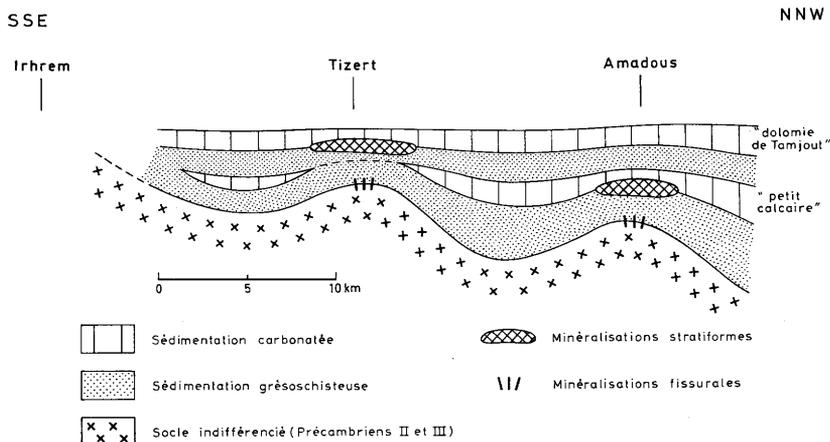


FIG. 1. — Coupe idéalisée de la transgression infracambrienne dans l'Anti-Atlas occidental transversalement à la chaîne.

Les observations les plus récentes font apparaître la généralité de ce contrôle paléogéographique, reconnu d'abord dans le Mansfeld (rote Faüle de Gillitzer, 1936), au Boléo (Wilson, 1955), en Zambie (Mendelsohn, 1961), maintenant à Lubin (barrière de Haranczyk, 1972), dans l'Anti-Atlas marocain (Pouit, 1966).

Tantôt les hauts-fonds ont été suffisamment surélevés, voire émergés, pour être dans des conditions oxydantes : ils sont alors stériles, mais la minéralisation est particulièrement riche à leur périphérie immédiate, tantôt le milieu reste réducteur au droit du haut-fond et la minéralisation se développe préférentiellement dessus.

Présence d'évaporites

Une liaison de proximité stratigraphique existe fréquemment entre les couches minéralisées et des évaporites, le plus souvent gypse ou anhydrite, mais aussi sel gemme. Contrairement à ce que pense Renfro (1974), les évaporites ne sont pas toujours au toit des couches minéralisées. Ainsi au Boléo, le gypse se développe-t-il à la base de la série pliocène sous l'ensemble des couches cuprifères. A Corocoro, les grès minéralisés sont situés stratigraphiquement au-dessus du gypse diapirique (Péllissonnier, 1964). Au Djezkazgan, des lits gypsifères existent à la fois au mur et au toit des grès cuprifères (Popov, 1959).

On rapprochera des évaporites l'observation fréquente de fissures de dessiccation, au sein des couches minéralisées : au mur et au toit des Kupferschiefer du Mansfeld (Wedepohl, 1964), à Chibuluma, Zambie (Garlick, 1972), à Tizert et Talate n'Ouamane, Maroc (Elsass, 1974), à Kamoto (Bartholomé, 1972).

On en conclut que les bassins transgressifs minéralisés n'étaient pas en communication parfaite avec la pleine mer.

Ainsi par touches successives se dessine d'une manière assez précise l'environnement paléogéographique des minéralisations.

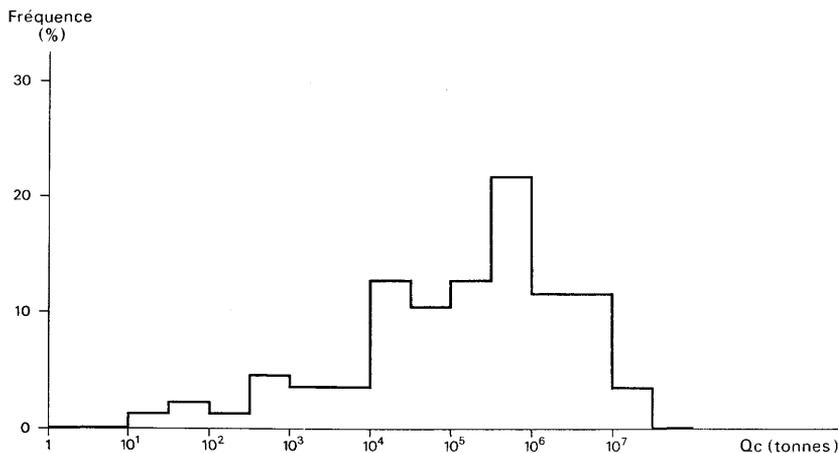


FIG. 2. — Histogramme des quantités de métal Qc au niveau des champs pour les gisements de schistes, marnes et grès cuprifères.

Relation avec la tectonique

D'une manière générale, les séries sédimentaires encaissantes sont tabulaires, ayant subi une tectonique de failles normales, sans déformation souple importante, même quand leur âge est assez ancien ; les bassins de sédimentation correspondent à des grabens souvent synsédimentaires. Il faut toutefois mentionner une exception importante, puisqu'elle concerne les riches gisements du Shaba et de Zambie. Au Shaba, une tectonique diapirique s'exacerbant en écailles, voire en véritables charriages, s'est développée à partir de failles, peut-être normales à l'origine, grâce à un niveau de base incompetent de nature singulière, les R.A.T. (roches argilo-talqueuses). D'après A. François (1973), cette tectonisation serait précoce, en partie contemporaine de la sédimentation de la série. A un moindre degré, le graben tertiaire de Corocoro (Bolivie) montre le même style tectonique (Péligssonier, 1964). En Zambie, il s'agit par contre d'un plissement accompagné de métamorphisme correspondant à une véritable reprise orogénique.

A l'échelle locale pour les occurrences dans les schistes et marnes, le jeu des failles normales ne paraît pas devoir contrôler directement la richesse de la minéralisation, sauf dans le district du Boléo, où apparaît une relation des enrichissements avec des failles synsédimentaires (Péligssonier, 1965). Les paléoreliefs favorables sont *exceptionnellement* (Boléo) déterminés par des failles synsédimentaires, à la différence des paléoreliefs favorables aux minéralisations plomb-zinc du type Mississippi Valley. Par contre, beaucoup d'occurrences de grès cuprifères sont étroitement associées à des failles, par exemple Old White Pine, d'après White et Wright (1954).

A une échelle plus régionale, il semble que la position des districts bien minéralisés puisse être corrélée avec la proximité des accidents de bordure des grabens (mais c'est aussi la limite paléogéographique du bassin sédimentaire !) : ainsi le district de Lubin est-il installé au contact de la limite de la grande dépression secondaire et tertiaire germano-polonaise, limite qui correspond aussi au front

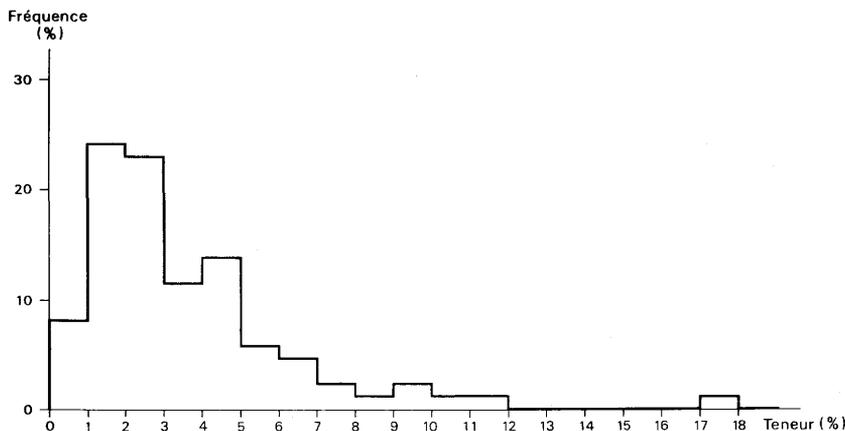


FIG. 3. — Histogramme des teneurs au niveau des champs pour les gisements de schistes, marnes et grès cuprifères.

nord-hercynien ; le district du Mansfeld est situé à la bordure d'un graben nord-nord-est - sud-sud-ouest individualisé à partir de la phase saalique du Permien inférieur ; White Pine s'étend parallèlement à quelque distance de la grande faille du lac Supérieur ; les gisements du Haut-Atlas marocain sont en relation avec la grande faille nord-atlasique ; le district de Corocoro-Chacarilla s'aligne en bordure d'un grand accident jalonné de diapirs. Cependant, ce genre de contrôle ne paraît pas s'appliquer au Shaba où l'arc lufilien richement minéralisé recoupe transversalement le graben synsédimentaire katangais ; les relations ne sont guère plus claires en Zambie. C'est seulement en prenant encore plus de recul, à l'échelle de la mégatectonique que Copperbelt zambien et Shaba peuvent apparaître comme un point singulier de croisement entre les kibarides et les damarides.

Ce qui vient d'être dit plus haut éclaire les relations des districts minéralisés avec la mégatectonique. *Ceux-ci correspondent à des zones de distensions.* Mais il ne paraît pas possible de préciser plus et notamment de s'intégrer dans les perspectives de la tectonique globale.

D'une part pour les époques anciennes, telles que le Précambrien supérieur, qui porte l'essentiel des minéralisations étudiées, la caractérisation des zones de subduction ou d'expansion reste encore à faire.

D'autre part, pour les époques récentes, il y a :

— soit ambiguïté : le Zechstein allemand et polonais se situe-t-il tardivement sur la zone de subduction nord-hercynienne ou précocement sur la zone d'expansion préalpine ? Le Pliocène du Boléo est-il relié tardivement à la subduction névado-laramienne ou associé à l'expansion de la dorsale du Pacifique Est ?

— soit lien direct avec une zone de subduction : Corocoro se trouve sur la zone de subduction orogénique andine ;

— soit lien direct avec une zone d'expansion : les occurrences du Crétacé inférieur de l'Angola et du Gabon sont installées d'une manière très précise sur la ride médio-atlantique à l'époque de sa naissance.

On peut tout de même préciser que dans les contextes de subduction orogénique,

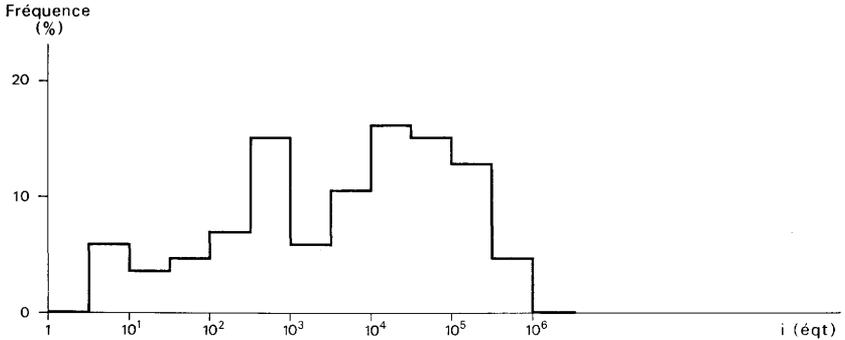


FIG. 4. — Histogramme des indices de concentration i au niveau des champs pour les gisements de schistes, marnes et grès cuprifères (éqt = équivalent tonnes à 100 %).

la mise en place des séries minéralisées se fait à une époque tardive « post-orogénique », quand ces zones font l'objet de distensions, liées aux réajustements isostasiques consécutifs à l'apparition du bourrelet sialique lors de la subduction.

Notons d'ailleurs les âges très particuliers « postorogéniques » des séries encaissantes :

- fin du dernier cycle précambrien avec 78,5 % du tonnage métal contenu : Zambie, Shaba, White Pine, Udokan, Anti-Atlas, Timna ;
- Dévonien à Carbonifère (postcalédonien) : Djezkazgan ;
- Permien, Trias (posthercynien) : Mansfeld et Lubin ;
- Postlaramien : Corocoro (Oligomiocène), Boléo (Pliocène) ; avec l'exception du Crétacé inférieur du bassin côtier de l'Angola et du Gabon.

Magmatisme associé

A l'échelle d'un district quelconque, il semble qu'il y ait indépendance entre corps minéralisés et roches magmatiques, tant les liaisons spatio-temporelles entre eux paraissent lâches. Cependant, d'un district à un autre, ces liaisons lâches sont très semblables, d'une manière troublante. Il nous faut donc les préciser.

Roches volcaniques

De puissantes manifestations volcaniques existent d'une manière très générale sous les séries transgressives minéralisées. A cette règle les seules exceptions paraissent Udokan, le Copperbelt zambien et le Shaba (à moins que les R.A.T. ne soient d'origine volcanique). Au Shaba, des roches volcano-détritiques sont connues au toit des minéralisations principales de la série de Roan (Oosterbosch, 1962 ; Machairas, 1974).

Dans les districts les plus minéralisés en cuivre, les volcanites sont surtout basaltiques ; mais il existe aussi des porphyrites acides. La caractérisation de la série magmatique correspondante à ces roches reste à faire.

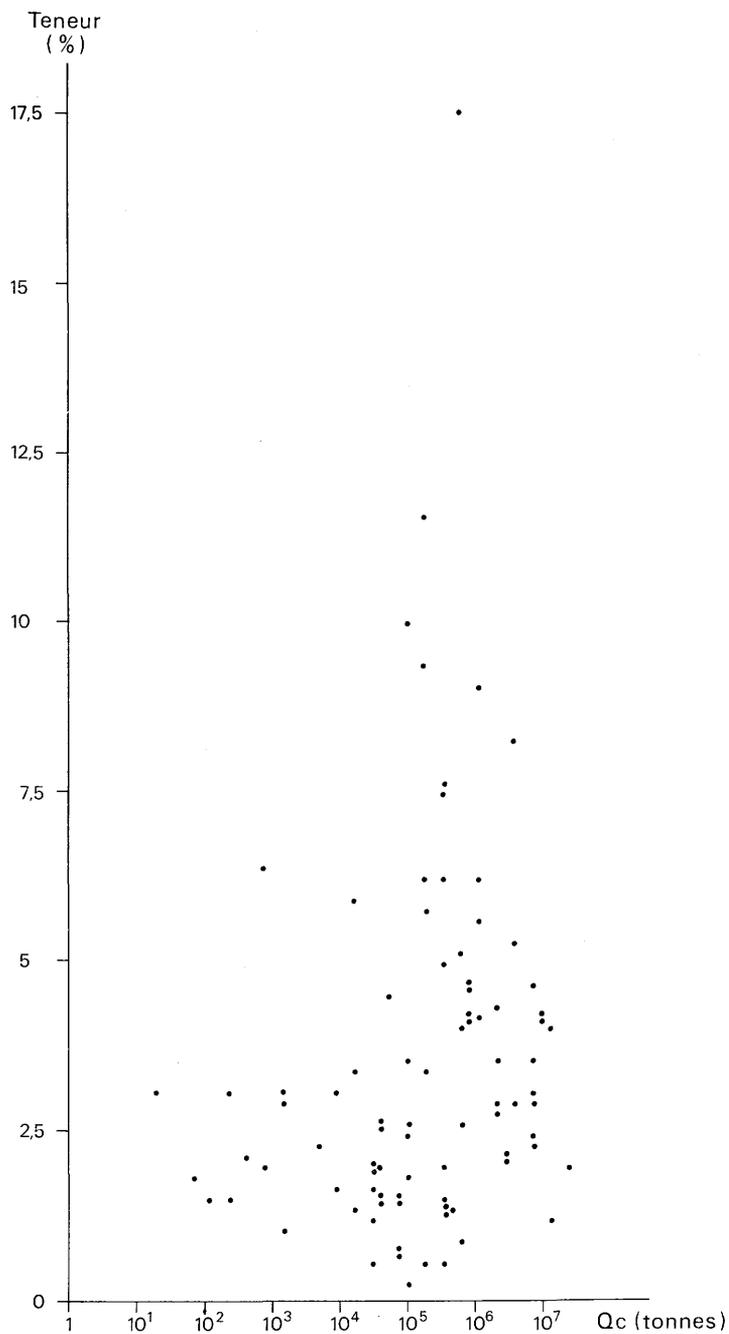


FIG. 5. — Champs cuprifères des gisements de schistes, marnes et grès représentés par leur tonnage métal contenu (Qc) et leur teneur.

Roches gabbroïques tardives en filons ou en sills

Dans les districts apparemment dépourvus de volcanites, des roches gabbroïques en filons ou en sills recoupent les séries minéralisées, notamment en Zambie, au Shaba, à Udokan (Bakun *et al.*, 1966) et dans l'Anti-Atlas marocain. Le problème de la liaison de ces roches avec les minéralisations cuprifères a été posé par Capponi (1963) pour le Shaba, par Fauvelet (1973) et Saadi (1971) pour l'Anti-Atlas marocain.

Relation avec le climat

On a beaucoup écrit à ce sujet, mais bien des points restent encore très hypothétiques. Le faciès rouge à la base des séries est interprété maintenant comme tropical humide ; les évaporites peuvent se développer dans une gamme très large de climats. Selon Wedepohl (1964) la flore contemporaine du dépôt des schistes cuprifères du Zechstein est une flore de climat à humidité relativement faible. N'oublions pas aussi qu'il y a des tillites dans les séries du groupe du Katanga !

Surtout, il n'apparaît pas que ce soit une variation de climat qui détermine l'arrivée de la sédimentation fine à faciès réducteur ; celle-ci résulte de la transgression elle-même.

LE CONTENU

Caractéristiques dimensionnelles

Il est intéressant de comparer la mise à jour effectuée ici avec les éléments du mémoire B.R.G.M. n° 57 publié en 1972, à partir de données arrêtées fin 1968. Notre inventaire actuel est plus complet, par comblement de certaines lacunes et par intégration des découvertes récentes : 87 champs contre 44 champs dans le premier inventaire.

Les gisements soumis à l'étude ont contenu avant toute exploitation environ 160 millions de tonnes de cuivre métal. A fin 1971, environ le quart en a été exploité.

Le tableau 1 montre que le type considéré vient en deuxième position pour le tonnage métal contenu derrière le type porphyrique. Son importance relative s'est affirmée, comme d'ailleurs celle du type porphyrique, notamment par rapport au type amas pyriteux⁽¹⁾. La teneur moyenne de l'ensemble des tonnages est de 2,40 % (contre 2,57 % dans le premier inventaire), elle reste donc très forte, très au-dessus de celle du type porphyrique dans le premier inventaire (1,01 %).

L'indice de concentration⁽²⁾, pondération des tonnages métal par les teneurs,

(1) Ce type apparaît stationnaire dans l'absolu, faute de découvertes nouvelles importantes et aussi en raison du reclassement de certains districts. Elimination notamment de Mount Isa, de Ruby Creek et de Tynagh. Le potentiel correspondant au stockwerk basal du district d'Huelva n'a pas été compté, mais pour les deux autres types des potentialités importantes dans les pays de l'Europe de l'Est n'ont pas non plus été comptabilisés. De sorte que les importances relatives entre les trois types doivent être assez bien respectées.

(2) Pour sa définition, voir MICHEL et PÉLISSONNIER (1964).

TABLEAU 1. — Répartition du tonnage métal (Q_c)
entre les trois principaux types de gisements de cuivre

Type	Mémoire BRGM n° 57		Mise à jour	% total
		% total		
Schistes, marnes et grès cuprifères (type n° 4)	105 Mt	26	160 Mt	29
Porphyrique (type n° 6)	190 Mt	47,5	280 Mt	51
Amas pyriteux étroitement liés aux roches volcaniques (type n° 1)	38 Mt	9,5	42 Mt	7,5
Autres types	67 Mt	17	68 Mt	12,5
Total	400 Mt	100	550 Mt	100

dépasse 5 Méqt⁽³⁾ contre 3,5 Méqt pour le premier inventaire. Vraisemblablement le type porphyrique est très en dessous de ce niveau, mais le calcul n'a pas été fait.

Le tableau 2 donne la comparaison entre les paramètres statistiques des distributions au niveau des champs dans le premier inventaire et dans la mise à jour. Il y a une assez grande stabilité dans les moyennes ou médianes ; les écarts types sont un peu réduits, mais restent encore très forts, dépassant toujours de beaucoup les écarts types des distributions pour les autres types du premier inventaire.

On retiendra donc que le type des schistes, marnes et grès cuprifères voit son importance confirmée, tant pour les tonnages que pour les teneurs ; qu'il renferme les gisements *les plus riches* sinon les plus gros ; que la teneur de coupure actuellement pratiquée est encore beaucoup plus élevée que pour les autres types et qu'en conséquence le potentiel à plus basse teneur paraît un objectif de prospection prioritaire ; *mais que la dispersion des tonnages et des teneurs reste beaucoup plus grande que pour les autres types*, ce qui rend la mise en évidence des facteurs propres à fournir les forts tonnages et fortes teneurs particulièrement désirables.

Minerais : répartition selon les roches support, texture et contenu chimico-minéralogique

Plusieurs découvertes récentes ont attiré l'attention sur les minerais gréseux, dont l'importance était jusqu'à présent limitée au Copperbelt zambien, où ils représentent près de 60 % du tonnage métal : en effet, à Lubin, Konstantynowicz (1973) indique que 46 % du tonnage métal est contenu dans des grès ; à Udokan,

(3) Eq_t = équivalent-tonnes à 100 %.

TABLEAU 2. — Paramètres statistiques des distributions du tonnage métal (Q_c), de la teneur (m) et de l'indice de concentration (i) au niveau des champs pour le type « schistes, marnes et grès cuprifères » (éqt = équivalents-tonnes à 100 %)

		Mémoire BRGM n° 57	Mise à jour
Nombre de champs		44	87
Q _c	Σ Q _c	72,5 Mt	140 Mt
	Médiane	225 000 t	140 000 t
	Maximum	20 Mt	20 Mt
	Écart-type logarithmique	1,502	1,318
m en %	Moyenne entre gisements	3,25	3,49
	Moyenne des tonnages	2,34	2,60
	Maximum	17,5	17,5
	Écart-type	3,23	2,75
i	Médiane	4 500 éqt	4 100 éqt
	Maximum	541 257 éqt	561 802 éqt
	Écart-type logarithmique	1,468	1,409

la minéralisation est exclusivement dans des niveaux gréseux. Sur les 160 millions de tonnes de métal inventoriés, un tiers environ correspond à du minerai gréseux, les deux autres tiers étant fournis par des shales plus ou moins carbonatés.

Une des caractéristiques fondamentales des minerais soumis à l'étude par rapport aux minerais d'autres types réside dans l'importance de la roche support — grès, argiles ou marnes : pas ou très peu de gangue au sens classique ; l'essentiel des minéraux non porteurs de métaux est constitué par les éléments proprement dits des roches supports, éléments détritiques ou néoformés (quartz, aluminosilicates, carbonates le plus souvent dolomitiques). La texture sédimentaire des roches supports est généralement conservée ; de nombreuses figures synsédimentaires (ripplemarks, stratifications entrecroisées, slumpings, figures de charge, microfailles...) ont été reconnues dans des échantillons de la plupart des districts, impliquant un dépôt sous faible tranche d'eau, généralement marin et/ou lagunaire pour les gisements de schistes et marnes, passant parfois latéralement à des formations

dunaires (Zambie) ; exceptionnellement pour certains gisements gréseux de deltas continentaux de piedmont (Djezkazgan, Udokan, Corocoro). Les minéraux cuprifères sont parfois antérieurs aux structures synsédimentaires : ainsi mentionne-t-on des grains détritiques arrondis de malachite, de chrysocolle (Udokan, U.R.S.S., anonyme, 1972), ou même de sulfures avec auréole superficielle de malachite (Sarhro, Maroc, Elsass, 1974 ; Udokan, anonyme, 1972), observation particulièrement convaincante. Plus souvent les sulfures, qui dominent très largement, apparaissent néoformés, soit interstitiels, avec un grain de dimension comparable au grain des éléments de la roche, soit formant de fins feuillets selon les strates, soit dans des microdiaclasses en veinules, soit encore en porphyroblastes, nodules ou framboïdes.

Du point de vue chimique et minéralogique, les minerais étudiés sont caractérisés par une *relative* pauvreté en soufre et fer, c'est-à-dire en pyrite ; non point qu'ils soient dépourvus de pyrite, mais il n'y a pas cette accumulation de pyrite massive, gangue exclusive de gisements étroitement liés à des roches volcaniques. D'une autre manière, on peut caractériser leur chimisme en précisant qu'il y a toujours dans chaque gisement *au moins une zone à chalcocite primaire*, même si par zonalité on passe à la bornite, à la chalcopyrite et à la pyrite. En plus de ces variations latérales, il faut noter un niveau de la quantité moyenne de pyrite assez notablement différent d'un district à un autre. La pauvreté en soufre et fer est souvent plus accentuée en milieu gréseux, conduisant même au cuivre natif à Corocoro et à Old White Pine.

Le caractère noir, voire bitumineux, de certains schistes cuprifères pose la question du rôle joué par le carbone et les matières organiques. Wedepohl (1964) indique nettement qu'il n'y a pas de relation entre la teneur en matière bitumineuse et celle en sulfures, même si de nombreux métaux peuvent être retenus par la matière organique. Une liste de ces métaux est donnée par Vine et Tourtelot (1970) : Ag, Mo, Zn, Ni, Cu, Cr, V et plus rarement Co, Pb, La, Y, Se, U, Tl. De fait, des teneurs anormalement élevées en ces métaux peuvent accompagner le cuivre dans les gisements étudiés. On enregistre en outre des teneurs anormales en Ti, Zr, liés aux détritiques d'après Vine et Tourtelot (1970), Mn lié aux carbonates d'après Wedepohl (1964) et aussi Pt, Pd, Au, W, Cd, Ge, Bi, As, Sb, Se, Re.

Ce spectre géochimique très large est susceptible de grandes variations. On remarquera d'une part la variation concomitante de Ag, Pb, Zn, Cd, Mo, Re : ces éléments sont particulièrement abondants dans le Zechstein d'Europe centrale et à Mount Isa ; ils sont par contre très faiblement représentés au Shaba et en Zambie. A l'inverse le cobalt + (Ni, U) est exceptionnellement représenté en Zambie et au Shaba, même si les autres districts en contiennent aussi anormalement, à l'exception de White Pine.

ZONALITÉ ET GISEMENTS ASSOCIÉS

Zonalité dans les schistes et marnes cuprifères

ZONALITÉ DES MINÉRAUX CUPRIFÈRES

Des zonalités verticales et horizontales sont observées dans tous les districts ayant donné lieu à des travaux miniers importants.

Horizontalement, la zonalité la plus classique est la suivante : pyrite-chalcopyrite-bornite-chalcocite. Garlick (1961) a proposé une interprétation de cette zonalité en rapport avec la paléogéographie : pyrite vers le large, chalcocite proche du littoral. Pour expliquer les trop nombreuses exceptions à cette règle, notamment les concentrations de pyrite sur les paléoreliefs, Garlick (1972) envisage une surimposition de remobilisations diagénétiques.

Verticalement, les zonalités décrites le plus souvent font apparaître la pyrite et la chalcopyrite au toit des minéralisations cuivreuses, par exemple à White Pine avec une très belle discordance sur la stratification d'après A. C. Brown (1971), au Shaba d'après Oosterbosch (1962). A Lubin et à Boleslawiec, on a de haut en bas chalcopyrite, bornite, chalcocite ; mais la chalcopyrite réapparaît à la base de la zone minéralisée dans les grès. Cependant, dans les schistes cuprifères du Zechstein allemand, les plus fortes teneurs en pyrite se trouvent à la base de la formation (Wedepohl, 1964).

On peut sans doute expliquer ces différences par le fait que les bancs les plus noirs et bitumineux sont les plus riches en pyrite.

ZONALITÉ DES MÉTAUX AUTRES QUE LE CUIVRE

Plomb, zinc

Verticalement, dans les schistes cuprifères allemands, le plomb et le zinc se développent au toit des schistes cuprifères en liaison avec l'augmentation des carbonates ; il en est de même à Lubin avec Cu, Pb, Zn de bas en haut.

Horizontalement, autour des « rote Fäule » stériles, une zonalité Cu-Pb-Zn a été très bien mise en évidence par Eisenhuth et Kautsch (1954). Mais à Lubin, la « barrière » de Haranczyk (1972), zone de haut-fond, est plombifère, le cuivre se répartissant autour. La « barrière » étant plus carbonatée, sans doute faut-il y voir une liaison plomb-carbonates.

A Mount Isa, le plomb et le zinc sont en corps séparés du corps cuivreux à son mur.

Cobalt

En Zambie, le cobalt sous forme de carrollite semble surtout associé à des zones à chalcopyrite et bornite. Au Shaba, si des zonalités Cu-Co existent, il est difficile à cause de la tectonique d'en dégager les lois.

Gisements gréseux

On peut distinguer trois sous-types dans les gisements gréseux.

1. Des gisements importants et autonomes vis-à-vis des schistes et marnes cuprifères, localisés dans des séries deltaïques continentales : les particularités de ces séries expliqueraient les différences de ces gisements avec ceux de schistes et marnes, notamment leur irrégularité et le déficit en soufre et fer plus accentué. A ce sous-type on peut rattacher Udokan, Corocoro et les gisements du Djezkazgan.

2. Des corps directement reliés aux schistes et marnes minéralisés, généralement en zonalité verticale vers le bas, parfois en zonalité horizontale (exemples : Lubin gréseux, Old White Pine, Mufulira). La concordance sur la stratification est

variable, assez forte en Zambie, faible ailleurs (voir par exemple pour Lubin, Haranczyk, 1972, fig. 3, p. 34).

3. De petits corps isolés en lentilles, spatialement liés à des accidents cassants et associés seulement à l'échelle du champ ou du district à des schistes et marnes minéralisés : ce sont les classiques petits « red beds » (Colorado, Oural...).

Minéralisations discordantes

Dans la plupart des districts, on trouve associées aux minéralisations stratiformes des minéralisations fissurales de caractéristiques chimico-minéralogiques variées.

Au sein même des formations stratiformes minéralisées

Ce sont en particulier les fameux « Rücken » du Mansfeld, qui se retrouvent à Lubin (Haranczyk, 1972). Minéralisations développées dans des fractures de tensions sans rejet, les « Rücken » peuvent être classés d'après F. Leutwein (1951) en deux catégories :

— les unes, directement liées aux Kupferschiefer, ont un chimisme à Co, Ni, U, Ag et sont d'ailleurs très peu cuprifères ;

— les autres à blende, pyrite, galène, s'apparenteraient à la formation FBa de Freiberg, dont l'extension est régionale.

Au mur des formations stratiformes minéralisées

En dehors des minéralisations gréseuses déjà envisagées et à chimisme particulièrement pauvre en soufre et fer, il existe dans d'autres districts et directement liées aux minéralisations stratiformes des fissures minéralisées dans le socle sous-jacent aux terrains transgressifs, plus particulièrement sur les paléoreliefs associés aux minéralisations stratiformes, paléoreliefs qui sont souvent des volcanites acides (Alous, Anti-Atlas, Maroc ; porphyres de Halle, dans le district du Mansfeld). De telles minéralisations paraissent *très générales* en Zambie (Mendelsohn, 1961) et dans l'Anti-Atlas marocain où nous avons eu l'occasion de les observer. Elles ne s'enracinent pas profondément dans le socle et contiennent le plus souvent chalcopyrite et pyrite.

Au toit des formations stratiformes minéralisées

Dans le cas très particulier où une grande faille tardive recoupe la série à minéralisations stratiformes, il peut se développer en bordure de la faille dans des fractures de tensions des minéralisations *cuprifères* filoniennes ou métasomatiques : c'est le cas du beau gisement de Kipushi (Shaba), riche en Cu, Pb, Zn, As, Ge, Re, Cd, et dans une moindre mesure en Ag, Mo et V. Nous mentionnerons également le petit gisement de Ouansimi (Anti-Atlas, Maroc).

Gisements associés

Des gisements d'autres métaux apparaissent en zonalité spatiale dans les mêmes séries transgressives.

Uranium, généralement au mur stratigraphique, en minéralisations concordantes ou discordantes (exemples : Shinkolobwe, Shaba ; Mindola, Zambie).

Manganèse, le plus souvent au mur stratigraphique (exemples : Idikel, Anti-Atlas, Maroc ; Mine Lucifer, Boléo ; Timna, manganèse au toit du cuivre).

Plomb et zinc, le plus souvent au toit stratigraphique (exemple : Mansfeld, Lubin, à l'exception de la barrière plombifère qui est un passage latéral des schistes cuprifères).

Mais il faut noter surtout la *complémentarité* : richesse en ces autres métaux là où il y a pauvreté en cuivre et réciproquement (exemples : uranium du Colorado, du Niger ; uranium et manganèse du Francevillien gabonais).

En outre, des gisements de cuivre, à chimisme particulièrement pauvre en soufre, se rencontrent dans les roches volcaniques basiques du substratum des séries transgressives : cuivre natif du lac Supérieur ; petites occurrences du Palatinat (type Nahe de Schneiderhöhn, 1941) ; nouveau district de Coppermine River, Mackenzie, Canada (Kindle, 1972).

CONCLUSION : HYPOTHÈSES SUR LA GENÈSE DES GISEMENTS ÉTUDIÉS

De quelle nature est l'unité du type étudié ? Au terme de cette analyse, on voit peut-être mal la coupure d'avec le type vulcanogène, qui comporte aussi pour certains gisements une association étroite avec des schistes noirs (Huelva, Timmins, par exemple), ainsi qu'avec des paléoreliefs (mais qui sont exclusivement volcaniques). Les kurokos japonais ou le gisement chilien de Cerro Negro (Péligssonnier, 1971) semblent d'ailleurs faire la transition. Rappelons que les caractères du type vulcanogène sont, outre une liaison spatiale très étroite avec des volcanites de caractère calco-alcalin, un âge précoce dans une zone orogénique et un énorme excédent de pyrite. Le fait que ce type ait des éléments en commun avec le type étudié implique seulement que certains facteurs du processus génétique soient communs (par exemple, dans les deux cas, milieu réducteur = schistes noirs).

Si les gisements rassemblés de schistes et marnes cuprifères présentent une très grande variation dans certains caractères (caractéristiques dimensionnelles, spectre chimico-minéralogique), un certain flou pour d'autres (tectonique à toutes échelles, magmatisme intrusif et extrusif), leur point commun est finalement d'avoir une relation avec un environnement paléogéographique très particulier (position précise dans une transgression, ordonnée autour de paléoreliefs et correspondant à un bassin mal relié à la pleine mer), ainsi qu'une association avec des minéralisations plus ou moins discordantes, notamment dans les grès ou le socle sous-jacent.

La difficulté à rendre compte à la fois de ces deux faits d'observation explique la multiplicité des hypothèses génétiques qui ont été émises.

Le mode de dépôt est clairement syngénétique : comment expliquer autrement la distribution étendue et remarquablement uniforme du cuivre dans des limites stratigraphiques étroites et correspondant à des niveaux préférentiellement imperméables ? De Launay (1913), Lindgren (1933) et Schneiderhöhn (1926) n'avaient point eu d'hésitation à ce sujet. Le caractère réducteur du bassin permet le dépôt des sulfures.

Pourtant, dans la ligne du diplogénétisme de T. S. Lovering (1963), P. Bartholomé, dans plusieurs notes (1963, 1972, 1973) pour les gisements du Shaba, puis A. C. Brown (1971) pour White Pine, proposent un compromis entre syngénèse et épigénèse : combinaison diagénétique entre un soufre syngénétique apporté par le milieu marin et un cuivre apporté épigénétiquement du substratum : nous ne comprenons pas pour quelles raisons les réactions physico-chimiques envisagées par ces auteurs ne pourraient pas se produire syngénétiquement dans le bassin de sédimentation, ordonnées autour des sources d'apport métallique en provenance du substratum qu'ils suggèrent. Le fer de la pyrite normalement formé dans les boues euxiniques serait remplacé par le cuivre et le cobalt au voisinage des zones d'apport en provenance de la profondeur. Le mélange des eaux impliqué par les réactions paraît beaucoup plus facile dans le bassin qu'en milieu finement poreux. Et c'est la variation dans l'apport en provenance du substratum qui entraînerait la variation stratigraphique du toit cuivreux constatée par Brown à White Pine.

Pour les mêmes raisons de souci de conserver une syngénèse inscrite dans les faits d'observation et de difficulté au brassage des eaux souterraines de différentes provenances, nous écartons l'hypothèse de la sabkha de Renfro (1974), modèle de toute manière trop précis pour pouvoir s'adapter à toute la famille des gisements considérés. D'ailleurs, la sabkha n'explique pas du tout la liaison avec les paléoreliefs.

Le problème principal à résoudre reste donc celui de la source des métaux. Trois hypothèses principales ont été envisagées qui, toutes les trois, prennent appui sur la relative fermeture du bassin attestée par les fissures de dessiccation et les évaporites :

- apport continental par drainage superficiel ;
- apport continental par drainage souterrain relié ou non à des exhalaisons magmatiques ;
- apport d'eau marine.

Apport continental par drainage superficiel

L'apport continental par drainage superficiel a été proposé avec quelques détails par F. Cachau-Hereillat (1965) pour le cuivre du bassin permien de Saint-Affrique (France) : le cuivre arraché par l'érosion au substratum proche serait stocké durant les phases oxydantes de la sédimentation dans l'eau du bassin supposé fermé et ne se déposerait que durant les phases réductrices dans des vases où la compaction achèverait de le concentrer, phases réductrices corrélées avec un brutal enfouissement transgressif du bassin. Les zones plus riches au voisinage d'accidents cassants ou de paléoreliefs résulteraient d'une sécrétion latérale diagénétique, facilitée par la compaction des argiles et marnes. La généralisation de cette hypothèse à de plus grands bassins comme celui du Zechstein n'est pas sans poser certains problèmes. Ainsi Ekiert (1960) considère que les 350 km² du Harz fourniraient trop peu d'eau douce pour alimenter en cuivre la « mer » du Zechstein environnante.

En outre, la sécrétion latérale est difficile à envisager pour des structures au sens pétrolier du terme qui sont restées fermées.

Apport d'eau marine

Dans l'espoir de mieux expliquer l'enrichissement autour des « rote Fäule », Brongersma Sanders (1966) propose l'apport métallique par des courants de fond de type estuarien en provenance de la haute mer. On voit mal la disposition concen-

trique des métaux autour des multiples « rote Fäule » mis en évidence au Mansfeld résulter de tels courants. En outre, pour quelles raisons ces courants donneraient-ils des dépôts cuprifères à certaines époques seulement ? On aimerait une confirmation actuelle de tels dépôts.

Apport continental par drainage souterrain

La théorie des « Rasenkupferstein » (Fulda, 1935) envisage que le cuivre d'abord concentré dans les parties supérieures des grès rouges par évaporation ait été repris et redéposé lors de la transgression. Elle se fonde sur le blanchiment épigénétique des grès du Rotliegendes du Zechstein, blanchiment qui résulte de la réduction du fer par la matière organique du schiste bitumineux cuprifère. Comme Wedepohl (1964) le remarque, le volume de la tranche blanchie des grès aurait été insuffisant pour fournir le cuivre des schistes cuprifères ; d'ailleurs à Lubin les grès blancs contiennent aussi du cuivre à des teneurs très fortes ; celui-ci n'a donc pas été lessivé.

A cette théorie d'un lessivage subsouterrain quasiment sur place, nous proposons de substituer une hypothèse de lessivage véritablement souterrain avec mise en charge des eaux douces par les reliefs avoisinants. Nous pensons que les eaux douces ascendantes remontent dans le bassin préférentiellement sur les hauts-fonds pour la double raison d'une couverture sédimentaire vaseuse imperméable plus mince et d'une charge en eau salée lourde plus faible, mais ceci n'a pu être observé dans la nature actuelle faute de moyens d'expérimentation (4).

Ces eaux douces déposeraient :

— en partie leur stock métal en profondeur, pour expliquer les minéralisations discordantes associées, dont le chimisme trop souvent constitué de pyrite et de chalcoppyrite ne peut provenir d'une action *per descensum* ; ce dépôt aurait lieu soit avant le dépôt stratiforme dans le bassin, pour expliquer la reprise parfois constatée sous forme de minéraux cuprifères détritiques, soit en même temps, soit même plus tardivement si la structure reste perméable ;

— en partie leur stock métal dans le bassin de sédimentation dès leur arrivée en milieu réducteur.

Cette hypothèse proposée par l'un de nous (H. P.) en 1965 pour le district du Boléo explique bien le dépôt ordonné autour des paléoreliefs dans le premier niveau réducteur *seulement*. En effet, le dépôt même de la série sédimentaire bloque rapidement, en l'absence de failles postérieures, le dispositif de remontée des eaux. Et le déplacement des niveaux minéralisés avec la transgression (fig. 1) trouve aussi son explication. Ce dispositif jouera normalement pour des eaux vadoses, mais rien n'empêche qu'il joue aussi pour des eaux juvéniles.

Quant à l'hypothèse du nourrissage des gisements stratiformes par l'érosion des minéralisations discordantes sur les paléoreliefs proposée par Voet et Freeman (1972) pour Chingola (Zambie), elle n'explique pas pourquoi l'érosion laisserait *toujours* des minéralisations dans le socle s'étendant à *profondeur faible*.

Quoi qu'il en soit, d'un lessivage superficiel ou souterrain, le socle intervient de toute façon pour féconder plus ou moins les structures potentielles : certains auteurs l'ont bien compris ainsi (Rentzsch, 1966). Sous cet angle, on appréhende

(4) Seuls les griffons *karstiques* sous-marins ont un débit suffisant pour être repérés avec les techniques actuelles.

mieux les grandes variations dans les caractéristiques dimensionnelles et les spectres chimico-minéralogiques, les complémentarités entre métaux. *L'unité est finalement dans le processus, la diversité dans les caractéristiques des socles.* Pour le cuivre, si l'on veut mieux définir le facteur régional favorable, en nous fondant sur le caractère sidérophile d'une grande partie du spectre géochimique associé, notamment sur le cobalt, nous pensons qu'il y aurait lieu de porter un effort sur la caractérisation pétrologique des séries à dominante basique sous-jacentes aux districts riches : volcanites du Rotliegendes du Mansfeld et de Basse-Silésie, du Keewenavien du lac Supérieur, du Miocène de Basse-Californie, du Précambrien terminal de Coppermine River (Mackenzie, Canada)...

Bibliographie

- ANONYME (1972). — Rapport de la mission française à Udokan.
- BAKUN, N. N., VOLODIN, R. N. and KRENDELEV, F. P. (1966). — Genesis of Udokansk Cupriferous Sandstone deposit (Chitinsk Oblast). *Int. Geol. Review*, Washington, Vol. 8, No. 4, p. 455-466.
- BARTHOLOMÉ, P. (1963). — Sur la zonalité dans les gisements du Copperbelt de l'Afrique centrale. *Symposium, Problems of Postmagmatic Ore Deposition*, vol. 1, Prague, p. 317-321.
- BARTHOLOMÉ, P. (1969). — White Pine et Kamoto, deux gisements stratiformes de cuivre. *Bull. Acad. roy. Sci. Outre-Mer*, Bruxelles, p. 397-410.
- BARTHOLOMÉ, P. (1972). — Métallotectes du gisement de Kamoto (République du Zaïre). *Bull. Acad. roy. Sci. Outre-Mer*, Bruxelles, fasc. 3, p. 586-598.
- BARTHOLOMÉ, P. et al. (1973). — Diagenetic ore-forming processes at Kamoto, Katanga, Republic of the Zaire. In: Amstutz, G. C. and Bernard, A. J., *Ore in Sediments*, Berlin, Springer-Verlag.
- BRONGERSMA-SANDERS, M. (1966). — Metals of Kupferschiefer supplied by normal Sea Water. *Geol. Rundsch.*, Stuttgart, Bd. 55, p. 365-375.
- BROWN, A. C. (1971). — Zoning in the White Pine Copper Deposit, Ontonogan County, Michigan. *Econ. Geol.*, Vol. 66, p. 543-573.
- CACHAU-HEREILLAT, F. (1965). — Contribution à l'étude des minéralisations cuprifères du bassin permien de la basse vallée du Dourdou (Aveyron). *Bull. B.R.G.M.*, Paris, n° 6, p. 37-95.
- CAPPONI, A. (1963). — Les gîtes de cuivre du Katanga. Essai de mise au point métallogénique. Rapport inédit, Grenoble.
- EISENHUTH, K. H. und KAUTSCH, E. (1954). — *Handbuch für den Kupferschieferbergbau*. Leipzig, Fachbuch Verlag, 335 p.
- EKIERT, F. (1960). — Neue Anschauungen über die Herkunft des in den Sedimenten des Unteren Zechsteins auftretenden Kupfers. *Freib. Forsch. H.*, C 79, p. 190-201.
- ELSASS, P. (1974). — Indices de cuivre stratiforme de l'infra-cambrien du Sarhro et du Siroua. Rapport A.R.M.I.N.E.S., inédit, Paris.
- FAUVELET, E. (1971). — Réflexions sur une liaison possible entre minéralisation cuprifère et roches plutoniques basiques hercyniennes dans l'Anti-Atlas (Maroc). *Colloque scientifique international*, Raguin, Paris, Masson et C^{ie}, 1973.
- FRANÇOIS, A. P. (1973). — *L'extrémité occidentale de l'Arc cuprifère shabien. Etude géologique*. Publications du Service géologique de Gécamines Likasi.
- FULDA, E. (1935). — Über Kupferschiefer und Kupferletten. *Z. dtsh. Gesell.*, Berlin, Bd. 87, p. 279.
- GARLICK, W. G. (1972). — Sedimentary environment of Zambian copper deposition. *Geol. en Mijnbouw*, Vol. 51, No. 3, p. 277-298.
- GILLITZER, G. (1936). — Die Geologie der Erzanreicherungen im mitteldeutschen Kupferschiefer. *Jb. Hall. Verb.*, 15, n.s., p. 9-27.

- HARANCZYK, C. (1972). — Ore mineralization of the lower Zechstein euxinic sediments in the fore-sudetic monocline. *Archiwum mineralogiczne*, Varsovie, t. XXX, 170 p. (anglais et polonais).
- HUTCHINSON, R. W. (1973). — Volcanogenic sulfide deposits and their metallogenic significance. *Econ. Geol.*, Vol. 68, p. 1223-1246.
- KINDLE, E. D. (1972). — Classification and description of copper deposits, Copper mine river area, district of Mackenzie. *Geol. Surv. Canada*, Ottawa, Bull. 214, 109 p.
- KONSTANTYNOWICZ, E. (1973). — Genesis of Permian copper deposits in Poland. *Internat. Geology Rev.*, Vol. 15, p. 1054-1066.
- LAUNAY, L. DE (1913). — *Traité de métallogénie*. Paris-Liège, Librairie Polytechnique Béranger, 3 vol., 855 p., 801 p., 985 p.
- LEUTWEIN, F. (1951). — Geochemische Untersuchungen an den Alaun- und Kieselschiefer Thürigens. *Arch. Lagerstättenforsch.*, Bd. 82, Berlin, Akad. Verlag.
- LINDGREN, W. (1933). — *Mineral Deposits*, 4th ed. New York, McGraw-Hill, 930 p.
- LOMBARD, J., NICOLINI, P. (1960-1962). — Gisements stratiformes de cuivre en Afrique. In : *Symposium sur le cuivre africain*, Assoc. Serv. Geol. Afr., 2 vol., 265 p., 216 p.
- LOVERING, T. S. (1963). — Epigenetic, diplogenic, syngenetic and lithogene deposits. *Econ. Geol.*, Vol. 58, p. 315-332.
- MACHAIRAS, G. (1974). — Découverte de roches volcano-détritiques associées à la minéralisation cuprocobaltifère du Shaba (Zaïre). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 278, p. 553-556.
- MENDELSON, F. (1961). — *The Geology of the Northern Rhodesian Copperbelt*. McDonald and Co., Ltd., London, 523 p.
- MICHEL, H., PÉLISSONNIER, H., PERMINGEAT, F., ROUTHIER, P. (1964). — Propositions concernant la définition des unités métallifères. In : *Communications scientifiques présentées à la Commission de la Carte géologique du Monde, 22th Int. Geol. Conf., New Delhi*, p. 149-153.
- NICOLINI, P. (1962). — L'utilisation des données sédimentologiques dans l'étude et la recherche des gisements stratiformes. Etablissement des « courbes prévisionnelles ». *Chron. Mines et Rech. min.*, n° 309, p. 155-167.
- OOSTERBOSCH, R. (1962). — Les minéralisations dans le système du Roan au Katanga. In : *Gisements stratiformes de cuivre en Afrique*. Symposium édité par J. Lombard et P. Nicolini, 1^{re} partie, 71-136. Paris, Association des Services géologiques africains.
- PÉLISSONNIER, H. (1964). — Structure géologique et genèse du gisement de cuivre de Corocoro (Bolivie). *Bull. Soc. géol. Fr.*, Paris, vol. 6, série 7, p. 502-514.
- PÉLISSONNIER, H. (1965). — La liaison des minéralisations cuprifères stratiformes avec les mouvements tectoniques d'après l'exemple du district du Boleo (Basse-Californie, Mexique). *Chron. Min. Recher. min.*, p. 43-52.
- PÉLISSONNIER, H. (1971). — Le gisement de cuivre stratiforme de Cerro Negro (Acon-Ca-Gua, Chili). *Bull. B.R.G.M.*, n° 6, p. 43-50.
- PÉLISSONNIER, H. (1972). — Les dimensions des gisements de cuivre du monde. Essai de métallogénie quantitative. *B.R.G.M.*, Orléans, mens., n° 57, 405 p.
- POPOV, V. M. (1959). — Lois géologiques de la distribution des grès cuprifères du Kazakhstan central. In : *Lois de la distribution des minerais*, vol. II, p. 183-208.
- POUIT, G. (1966). — Paléogéographie et répartition des minéralisations stratiformes de cuivre dans l'Anti-Atlas occidental (Maroc). *Chron. Mines et Rech. min.*, n° 356, p. 279-289.
- RENFRO, A. R. (1974). — Genesis of evaporite-associated stratiform metalliferous deposits. A Sabkha process. *Econ. Geol.*, Vol. 69, p. 33-45.
- SCHNEIDERHORN, H. (1926). — Erzführung und Gefüge der Mansfelder Kupferschiefers. *Metall u. Erz*. Halle, Bd. 23, p. 143.
- RENTSCH, J. (1964). — Der Kenntnisstand über die Metall- und Erzminerverteilung im Kupferschiefer. *Z. angew. Geol.*, Berlin, Bd. 10, Nr. 6, p. 281-288.
- SAADI, M. (1971). — Relationship between structural alignments associated with hercynian dolerite and copper deposits in Morocco. *Proceedings IMA-IAGOD Meeting*, IAGOD, p. 115-121.
- SCHNEIDERHOHN, H. (1941). — *Lehrbuch der Erzlagerstättenkunde*. Jena, Gustav Fischer Verlag, 858 p.
- VINE, J. D. and TOURTELOT, E. B. (1970). — Geochemistry of black shale deposits. A summary report. *Econ. Geol.*, Vol. 65, p. 253-272.
- VOET, H. W. and FREEMAN, P. V. (1972). — Copper ore bodies in the basal Lower Roan metasediments of the Chingola open pit area Zambian Copperbelt. *Geol. en Mijnbouw*, Vol. 51, p. 299-308.

- WEDEPOHL, K. H. — (1964). — Untersuchungen am Kupferschiefer in Nordwestdeutschland; ein Beitrag zur Deutung der Genese bituminöser Sedimente. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, Londres, Vol. 28, p. 305-364.
- WHITE, W. S. and WRIGHT, J. C. (1954). — The White Pine copper deposit, Ontonogan County, Michigan. *Econ. Geol.*, Vol. 49, p. 675-716.
- WILSON, I. F. (1955). — Geology and mineral deposits of the Boleo copper district, Baja California, Mexico. *U.S. Geol. Surv.*, Washington, Prof. Pap., 273.