

SUR L'AMPLEUR DE L'ALTERATION SUPERGENE DANS LA FORMATION DES GITES MINERAUX EXPLOITABLES

par

Hubert PELISSONNIER ¹

(3 figures)

"The best geological evidence of enrichment consists in the progressive, uniform impoverishment of all similar sulphide deposits in a given district, coupled with the condition that the change in ore should be dependent upon post-mineral topographic development. If the enriched zone is shallow, such evidence may be conclusive. If it is deep, there may be difficulties in arriving at a correct conclusion."

W. LINDGREN (1933)

RESUME.- L'approfondissement des travaux miniers dans nombre d'exploitations permet d'avoir une meilleure appréciation sur l'importance de l'altération supergène dans la formation des concentrations minérales. La prise en compte des données récentes de l'hydrogéologie permet d'en éclairer le mécanisme.

Ainsi la validité des schémas anciens peut-elle être étendue en ce qui concerne la zone d'oxydation à l'ensemble des gisements d'oxydes de manganèse, en ce qui concerne la zone de cémentation à l'ensemble des gisements de cuivre stratiformes du Shaba et de Zambie.

Sont ensuite analysés les schémas plus récents dans lesquels l'altération supergène agit sur une anomalie géochimique et non sur un gisement préexistant. Cette hypothèse paraît acceptable pour les rolls uranifères et les arkoses plombifères pédogénétiques, mais non pour les minéralisations karstiques plomb-zinc.

En conclusion on insiste d'une part sur l'unité entre les minéralisations oxydées et sulfurées supergènes, qui forment les deux éléments inséparables d'un même ensemble; d'autre part sur le caractère vivant, actuel du phénomène qui développe des minerais riches à faible profondeur, c'est-à-dire à portée de l'homme. On suggère enfin l'application à ce processus du modèle métasomatique de KORZHINSKII.

ABSTRACT.- A better appreciation of the importance of supergene alteration in the formation of mineral concentrations has been a result of the deepening of mining work in numerous exploitations. The above importance may be explained by recent hydrogeological data.

The validity of previous models concerning the oxidized zone may now be extended to include the set of manganese oxide deposits, and the supergene sulphides zone to include the stratiform copper deposits of Shaba and Zambia.

More recent models are then analysed in which supergene alteration affects a geochemical anomaly and not a preexisting deposits. This hypothesis seems satisfactory for uraniferous rolls and pedogenetic lead-bearing arkoses, but not for karstic lead zinc mineralizations.

In conclusion, one insists on one hand on the unity between the supergene oxidized and sulphidized mineralizations which are the two inseparable elements of a same unit, on the other hand on the actual and alive feature of the phenomenon which develops rich ores at low depth - i.e. within the reach of man - . The KORZHINSKII metasomatic model may be applicable.

¹ Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 60, Boulevard Saint-Michel, 75272 Paris Cedex 06.

I.- INTRODUCTION

Pour apprécier l'importance de l'altération superficielle, on se fonde généralement sur l'observation d'une variation minéralogique à partir de la surface topographique, interprétée en termes de potentiel d'oxydo-réduction des roches ou d'hydrolyse des silicates. Si l'altération est très profonde, aucune variation ne sera observée et l'on sera tenté de conclure qu'il n'y a pas altération, là où, en fait, l'altération est au contraire plus importante. En raison de cette approche, l'altération superficielle a pu être grandement sous-estimée.

A titre d'exemple, à Youssoufia (Maroc), le phosphate noir non altéré est apparu après 40 années d'exploitation correspondant à environ 50 millions de tonnes de phosphate blanc !

Rappelons que les actions d'altération supergène résultent du déséquilibre physico-chimique entre les eaux de pluies et les roches à travers lesquelles elles percolent : les eaux de pluies entraînent de l'oxygène et du gaz carbonique de l'atmosphère; elles sont donc oxydantes et légèrement acides, alors que les terrains sont plus souvent réducteurs.

Il en résulte très généralement une première réaction d'oxydation. En même temps, sous certains climats chauds et à forte pluviométrie, se produisent des réactions d'hydrolyse, qui décomposent notamment les silicates. Ces deux types de réactions, oxydation et/ou hydrolyse, provoquent la mise en solution de certains éléments. Perdant leur pouvoir oxydant, les eaux ont tendance à devenir progressivement réductrices. Du point de vue pH, la variation est plus complexe à analyser. Si la roche contient des sulfures, le pH s'abaissera du fait que l'oxydation produira de l'acide sulfurique. S'il y a hydrolyse avec mise en solution de bases fortes, il y aura au contraire augmentation du pH.

Dans le sens de circulation la zone de déséquilibre est assez étendue : il s'établit en effet une suite de réactions en chaîne conduisant non seulement à des dissolutions, mais aussi à des précipitations, avant qu'un équilibre ne soit trouvé entre l'eau et le terrain encaissant. Au fur et à mesure de l'introduction de nouvelles quantités d'eau, il y a déplacement progressif des fronts réactionnels de l'amont vers l'aval, selon le mécanisme proposé par KORZHINSKII (1) (1970) pour la méta-somatose. Classiquement on distingue :

- une zone d'oxydation caractérisée par des hydroxydes de fer, concrétionnés, scoriacés ou terreux et

- une zone de céméntation caractérisée par des sulfures secondaires plus riches en métal non ferreux et stables à des potentiels d'oxydo-réduction plus élevés que les sulfures primaires.

II.- DONNEES DE L'HYDROGEOLOGIE

Dans les conceptions anciennes des métallogénistes, il y avait cette idée que les eaux de pluie ne descendent que jusqu'au niveau hydrostatique et pas au-delà. Une autre idée, parfois sous-jacente, était que l'agent oxydant serait de l'air supposé exister seulement dans la zone non saturée en eau au-dessus du niveau hydrostatique. Or l'eau peut véhiculer de l'air à l'état dissous et dans la zone non saturée les gaz qui remontent à contre courant de l'infiltration descendante sont probablement souvent non de l'air, mais des produits des réactions d'oxydation tels que gaz carbonique ! Quand on trouvait des indices d'oxydation à grande profondeur (plusieurs centaines de mètres) sous le niveau hydrostatique actuel - de LAUNAY (1913) en cite de nombreux exemples - on imaginait parfois une ancienne période désertique durant laquelle le niveau hydrostatique aurait été abaissé jusqu'à cette profondeur (2). Cette explication n'est nullement satisfaisante : en effet dans ce type de régime hydrogéologique les eaux tendent plutôt à remonter par capillarité pour s'évaporer en surface et n'exercent aucun effet concentrateur per descensum; en outre la descente du niveau hydrostatique à de telles profondeurs est-elle possible ? A titre indicatif, signalons que dans un désert très pauvre en eau comme le Hoggar actuel, le niveau hydrostatique naturel ne descend jamais en-dessous de 50 m sous le niveau des alluvions des vallées.

Ainsi pour les anciens métallogénistes, tout était conditionné par le niveau hydrostatique. Que devenaient les eaux descendues jusqu'à ce niveau ? On ne s'en souciait pas en général. Il semble qu'implicitement il était envisagé une circulation latérale horizontale jusqu'aux vallées drainantes le long du niveau hydrostatique. Mais aucune conséquence n'était tirée de cette idée pour améliorer la définition des zones d'enrichissement supergène. Il y a pourtant concentration évidente, dans l'espace et dans le temps, du flux lessivant et précipitant vers les exutoires, c'est-à-dire vers les vallées

(1) Une présentation critique de la théorie de KORZHINSKII a été récemment faite en français par M. FONTEILLES (1978).

(2) A noter que certaines exploitations peuvent descendre à sec sous le niveau hydrostatique dans des terrains dépourvus de porosité ou isolés par de tels terrains des eaux de surface.

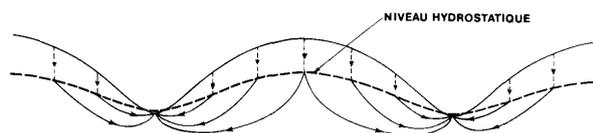


Figure 1

dans le cas de ce court-circuit souterrain (fig. 1). De fait, on peut observer dans le plan de certains filons un développement préférentiel de sulfures supergènes au passage des points topographiquement bas (cf. observations personnelles au filon de La Africana près de Santiago, Chili).

Si le niveau hydrostatique peut être considéré à l'étiage dans beaucoup de nappes en milieu très perméable comme la surface principale de l'écoulement souterrain, c'est loin d'être le cas général. De nombreuses données récentes des hydrogéologues font apparaître au contraire, notamment dans le cas de terrains culminant régionalement et relativement peu perméables, des circulations d'eaux météoriques actuelles à des profondeurs de plusieurs kilomètres sous la surface topographique (PELISSONNIER, 1978). Le circuit souterrain dans son ensemble comprend une branche descendante - celle qui nous intéresse ici - suivie d'une branche ascendante.

Il nous faut réfléchir aux conditions d'établissement et de fonctionnement de tels circuits : le moteur principal est la différence d'altitude entre zone d'infiltration et zone d'exutoire créant la différence de charge hydrostatique. L'écoulement superficiel doit être faible, sinon nul, ce qui se produit chaque fois qu'une pénélaine a été exhaussée par rapport au niveau de base, tant que l'érosion remontante n'a pas sculpté un nouveau réseau hydrographique. Ces périodes ont toujours été considérées comme assez brèves et l'on a tendance dans un premier temps à imaginer que la percolation souterraine lente et généralisée qui doit s'effectuer dans ces moments privilégiés s'arrête ensuite lorsque le réseau hydrostatique drainant a été reconstitué. C'est compter sans l'influence de l'altération - dissolution auto-produite par la circulation. Celle-ci doit jouer un rôle capital. En effet d'une part la percolation n'est pas homogène : parfaitement soumise à des lois analogues à celles du courant électrique, elle "shunte" les zones "résistantes" en utilisant les discontinuités conductrices (fissures continues de la tectonique cassante,

couches sédimentaires perméables en petit . . .); c'est la perméabilité relative qui compte. Dans la mesure où la circulation entraîne des éléments en solution, la perméabilité des zones de circulation augmente relativement, canalisant davantage la circulation vers ces zones, ce qui a pour effet de développer la dissolution et donc la perméabilité; cet auto-entraînement provoque une évolution exponentielle, bien décrite à propos des circulations karstiques dans les formations carbonatées, mais sans doute beaucoup plus générale. Du point de vue qui nous occupe, ce processus explique d'une part la canalisation de la circulation à des zones restreintes, bien nécessaire si l'on veut comprendre la genèse de concentrations; d'autre part la permanence dans le temps du fonctionnement du dispositif souterrain : une fois créé, celui-ci va continuer à concurrencer le drainage superficiel, même lorsque celui-ci reprendra.

Citons un exemple actuel non métallogénique : la vidange souterraine de la haute plaine (600 m d'altitude) de Tripolis (Péloponnèse, Grèce) dont les résurgences se font en mer.

Un autre facteur bien nécessaire est la pluviosité régionale : plus le flux entrant est important, plus les actions d'altération conditionnées par ce flux doivent pouvoir se développer. A cet égard il est curieux de constater que les enrichissements sont bien décrits surtout en climat désertique, là où les flux sont relativement faibles. Ainsi pour les gisements de cuivre porphyrique, dans les zones désertiques du Nord du Chili, du Sud du Pérou ou de l'Arizona, on observe souvent une couche enrichie subhorizontale (blanket) de quelques centaines de mètres d'épaisseur dont le toit est à moins de 100 m du fond des hautes vallées et généralement subaffleurant vers l'aval (voir par ex. pour Salvador (Chili), GUSTAFSON & HUNT, 1975; pour Teniente (Chili), CAMUS, 1975). Selon l'indication de LINDGREN lui-même, citée en exergue, cette caractérisation aisée ne tiendrait-elle pas au fait que dans ces cas l'altération est relativement peu développée ? Les causes de ce sous-développement seraient d'une part la faible pluviosité de ces régions, d'autre part l'importance du relief et de l'érosion mécanique, qui privilégient les circuits souterrains relativement superficiels grâce au drainage facile vers des vallées proches.

En résumé, on imaginait autrefois l'enrichissement supergène par la conjugaison de deux facteurs s'enchaînant dans le temps :

- descente des éléments métalliques au niveau hydrostatique par l'infiltration des eaux pluviales y déter-

minant un dépôt de cémentation et

- descente parallèle par érosion mécanique de la surface topographique et du niveau hydrostatique, entraînant vers le bas le dépôt de cémentation.

Sans dénier sa valeur au schéma précédent, qui doit jouer sur terrains peu perméables à fort relief, une autre possibilité existe : circuits profonds s'établissant sur plateaux perméables à érosion mécanique nulle où l'apport renouvelé d'eau pluviale oxygénée déplace progressivement le "bouchon" de cémentation vers l'aval du circuit. Je vais m'attacher à présenter quelques observations sur gisements qui peuvent s'interpréter dans ce sens.

III.- IMPORTANCE DU REMANIEMENT SUPERGENE SUR GISEMENTS PREEXISTANTS

MINERALISATIONS CUIVRE, PLOMB, ZINC D'AFRIQUE CENTRALE (SHABA, ZAMBIE)

Les conditions hydrogéologiques énumérées plus haut me paraissent particulièrement bien satisfaites au Shaba et dans le Nord de la Zambie : plaine d'altitude élevée (1200 m) d'où émergent quelques rares inselbergs; nombreux marécages indice d'un mauvais drainage superficiel, zone limite entre 3 bassins hydrographiques - Congo, Nil, Zambèze - favorable aux captures souterraines par le bassin voisin; pluviosité importante, de l'ordre de 1,30 mètre. A partir de la littérature je vais relever sur ces gisements un certain nombre de faits qui font apparaître des actions supergènes profondes.

Dissocions le cas des gîtes discordants sur la stratification de celui des gîtes concordants.

Gîtes discordants

Les deux principaux gîtes discordants sont Broken Hill et Kipushi.

Broken Hill (Zambie)

Les corps minéralisés de Broken Hill (Zambie) sont constitués par un noyau de blende-galène-pyrite dépourvu de gangue et entouré d'une enveloppe de minerai oxydé qui s'étend continûment jusqu'à la plus grande profondeur atteinte, soit 1.550 pieds en 1965 (WHYTE, 1968). Le minerai oxydé résulte de la transformation du minerai sulfuré : à proximité du noyau sulfuré, on observe des reliques de minéraux sulfurés qui disparaissent en s'écartant davantage. Dans certaines de ces reliques en blende, traversées de veinules de smithsonite, TAYLOR (1958) a observé au micros-

cope de fins lisérés de galène, toujours entre blende et smithsonite, qu'il interprète comme déplacement de la blende par la galène dans la réaction d'oxydation de la blende - donc galène supergène (3). En outre, des vides karstiques existent dans la dolomie encaissante au moins jusqu'à 850 pieds (TAYLOR, 1958). Au démarrage des travaux miniers, le niveau hydrostatique se trouvait pourtant à moins de 50 pieds sous la surface.

Kipushi (Shaba, Zaïre)

Ce gisement de caractère très vertical affleure dans une zone plate, située dans le bassin hydrographique du Nil en un point proche du point triple de partage des eaux superficielles Nil-Congo-Zambèze.

D'après M. ROBERT (1946) in PLACET (1975), "le niveau hydrostatique avant l'exploitation minière se trouvait à 30 m au-dessous du niveau de la rivière Kipushi voisine". Une telle disposition suppose des pertes de la rivière vers le gisement. De fait, sur le site même du gisement, des effondrements de type karstique avaient été repérés avant l'exploitation. Un autre point de repère hydrogéologique est le niveau des sources des rivières zambiennes du bassin du Zambèze au Sud qui s'établit à environ 100 mètres au-dessous du niveau hydrostatique de la mine de Kipushi avant exploitation (G. BRIART, 1948 in PLACET, 1975). L'ensemble de ces conditions correspond clairement à un dispositif naturel de type siphon renversé.

D'après INTIOMALE & OOSTERBOSCH (1974), la base de la zone d'oxydation se trouvait à une quinzaine de mètres sous le niveau hydrostatique initial. Ces auteurs ajoutent que "des effets de l'oxydation d'origine superficielle ne sont pas absents dans la zone sulfurée profonde". Plus loin dans le même article, INTIOMALE & OOSTERBOSCH montrent pour les minerais de cuivre la continuité des structures entre zones oxydées et certaines zones sulfurées : "la répartition minéralogique du cuivre sous ses trois formes, chalcopryrite, bornite et chalcocite, est, dans le massif nord, nettement une répartition zonaire tubulaire autour d'un petit nombre d'axes subverticaux situés sur la faille ou à l'intérieur du massif. Dans les zones axiales des niveaux supérieurs, on trouve de la chalcocite accompagnée de minéraux d'oxydation, cette association faisant place dans les niveaux inférieurs à l'association bornite-chalcocite, puis à la bornite seule. Les zones axiales sont entourées d'enveloppes successives constituées par de la bornite accompagnée de chalcopryrite,

(3) La même structure a été observée par N. MELIDONIS (1963) à Anaphi (Cyclades, Grèce).

puis par de la chalcopryrite seule, puis par l'association chalcopryrite-pyrite". Ne s'agit-il pas là d'une zonalité supergène avec cette variation progressive du chimisme à partir d'une partie supérieure clairement oxydée ? On serait en présence des différentes zones d'un processus métasomatique de percolation descendant, modélisable selon le schéma de KORZHINSKII (1970), développé pour les percolations ascendantes à l'origine des minéralisations de type skarn. Signalons que A. LAMBERT (1978) est arrivé à reproduire très simplement ces différentes zones par percolation artificielle en laboratoire.

Gîtes concordants

"Copperbelt" de Zambie

Ces minéralisations cuprifères, parmi les plus riches du monde, sont presque totalement lessivées aux affleurements. Aussi, au début de ce siècle, à une époque où la prospection géochimique n'existait pas encore, a-t-il fallu beaucoup d'opiniâtreté et plus d'une trentaine d'années pour les mettre en évidence (NICOLINI & TROLY, 1962). FLEISCHER *et al.* (1976) signalent même qu'"un lessivage profond descendant le long de minces lits poreux jusqu'à 500 m ou plus est commun". Citons quelques exemples :

Ces mêmes auteurs précisent qu'"à Kirila Bomwe Sud au-dessus du niveau 580 m, la chalcocite (partiellement primaire) est prédominante dans l'unité B; et au-dessus du niveau 420 m, on trouve la malachite, principal minerai au voisinage des affleurements". McKINNON & SMIT (1961) indiquent qu'"à Mimbula la chalcocite est le sulfure le plus abondant" et que "la plupart des chalcocite et covellite sont présumées supergènes". Ils rapportent aussi qu'"à N'Changa des minéraux oxydés sont associés à des lits plus perméables dans lesquels les eaux oxygénées (de surface) ont pu pénétrer profondément grâce à un effet de siphon inversé". J.A. BANCROFT (1929) note à N'Kana qu'"à une profondeur de 2.200 pieds, bornite, chalcocite et chalcopryrite avec un peu de linnéite et de cuivre natif sont présents dans les lits les plus poreux tandis que les lits plus denses ont des teneurs beaucoup plus basses et contiennent seulement chalcopryrite et pyrite". Il ajoute que "les lits poreux sont suffisamment ouverts pour avoir permis la circulation facile des eaux depuis la surface et que certaines cavités drusiques contiennent des hydroxydes de fer".

Si maintenant on examine la zonalité minéralogique des minerais pour l'ensemble des gîtes situés à l'Ouest de l'anticlinal de la Kafue et relatif au niveau

principal de shales (c'est-à-dire en excluant seulement Chibuluma et Mufulira), on constate que, à quelques irrégularités près, les zones suivantes - malachite, malachite-chalcocite, chalcocite, chalcocite-bornite, bornite-chalcopryrite, chalcopryrite, pyrite - s'ordonnent en fonction de la profondeur (v. en particulier la fig. 71 de SCHWELLNUS, 1961, p. 229, donnant la zonalité pour l'unité B de Bancroft = Kirila Bomwe).

Pourquoi cette zonalité, en rapport direct avec la surface topographique actuelle et avec les observations qui viennent d'être rappelées ne serait-elle pas interprétée comme supergène ?

Gisements shabiens

Les affleurements étaient spectaculaires, contrastant avec ceux de Zambie. Il s'agissait de minerais oxydés très riches, principalement carbonatés, développés jusqu'à une profondeur importante de l'ordre de 100 à 200 m. Cette importance des carbonates de cuivre est à mettre en rapport avec le chimisme des roches encaissantes, beaucoup plus carbonaté qu'en Zambie : compte tenu du caractère sulfuré des minéralisations en profondeur, on peut penser que les eaux superficielles ont oxydé les sulfures de cuivre en sulfates, immédiatement piégés par le milieu carbonaté. Le départ du calcium et du magnésium sous forme de bicarbonates solubles a provoqué l'enrichissement en cuivre observé en surface, ainsi que la silicification de certains horizons, notamment les dolomies récifales ("Roches siliceuses cellulaires" - RSC - passant en profondeur à des dolomies massives). Est-ce à dire qu'aucun lessivage du cuivre en surface n'est intervenu, comme certains ont pu le penser ?

Il faut d'abord noter que des traces d'oxydation se manifestent à grande profondeur. Sur des échantillons de Kambove, R. PLAT (1977) a observé malachite et hydroxydes de fer à 600 m de profondeur au niveau des CMN. OOSTERBOSCH (1962) indique que "les accidents tectoniques ont eu pour effet de prolonger l'oxydation et surtout la cémentation suivant des digitations profondes pouvant atteindre plus de 1.000 m sous la surface". De fait la chalcocite et même la bornite paraissent souvent de cémentation. R. PLAT (1977) a observé dans des échantillons de Kambove des reliques de pyrite ou de chalcopryrite entourées d'auréoles de bornite au sein de grandes plages de chalcocite, structure tout à fait identique à celle observée par H. VINCIENNE (observation inédite, 1961) dans le gisement filonien de La Africana (Chili) : à La Africana, la bornite, absente du protore, n'est présente que dans la zone de cémentation sous forme de fines

auréoles réactionnelles entre chalcocite et reliques de chalcopryrite.

Ainsi donc les minéralisations stratiformes cuprifères de Zambie et du Shaba, comme les minéralisations discordantes, paraissent avoir été remaniées jusqu'à une grande profondeur par une circulation souterraine subactuelle. Ce remaniement, interprété à la lumière de la théorie de KORZHINSKII, tend à former des zones monominérales et permet de définir un enrichissement considérable. On aurait là une explication du scandale représenté par les si fortes teneurs en cuivre du Shaba et de Zambie.

GISEMENTS DE MANGANESE

La liaison des minéralisations manganésifères avec les altérations de surface est connue depuis longtemps. Citons de LAUNAY (1913) : "Pour le manganèse on constate toujours une disparition en profondeur. Le minerai de manganèse paraît se transformer en minerai de fer, quand on s'enfonce. Il semble n'exister de minerai riche manganésifère que dans la zone d'oxydation, parce que l'altération simultanée du fer et du manganèse détermine un enrichissement relatif en manganèse... Plus bas, dans la zone de cémentation, en terrain calcaire, on peut rencontrer des carbonates de manganèse, qui, eux-mêmes, disparaissent en profondeur".

Pour tous les gisements où le support du manganèse s'enracine en profondeur, l'approfondissement des travaux miniers a permis de confirmer sans ambiguïté le caractère supergène des minerais oxydés riches. Citons Grand Lahou (= Mokta), Côte d'Ivoire (GRANDIN & PERSEIL, 1977), Tambao, Haute-Volta (H. SANGUINETTI, comm. orale, 1978), Kisengué, Zaïre (DOYEN, 1974), Bou Arfa, Maroc (observations personnelles), où les lentilles de manganèse oxydé d'Aïn Beida passent en profondeur à des hydroxydes de fer.

Dans le cas des gîtes tabulaires, proches de la surface topographique, voire en buttes-témoins, la totalité de la minéralisation primaire peut être oxydée, au point que la transformation elle-même devienne difficile à saisir. A Serra do Navio, Brésil (SCARPELLI, 1970), si les minerais oxydés objets de l'exploitation résultent de l'altération météorique, des lentilles carbonatées interprétées comme protore par SCARPELLI, ont été reconnues par sondages non loin de la surface. Au grand gisement de Moanda (Gabon), F. WEBER (1969) n'a réussi à comprendre l'importance de l'altération supergène dans la formation du minerai exploité que grâce à un sondage d'exploration dans un graben voisin - le sondage de Bangom-

bé - où le niveau porteur était protégé de l'altération par des shales surincombants. A l'Imini (Maroc), BEAU-DOIN *et al.* (1976) ont montré qu'aucune partie du gisement n'a échappé à l'altération supergène. Les oxydes et hydroxydes de fer forment une frange à la limite Nord du gisement, passage du manganèse au fer qui ressemble à celui décrit par de LAUNAY et rappelé plus haut. La rhodochrosite de cémentation signalée par de LAUNAY s'observe clairement à Moanda au mur du gisement, à Capillitas (Argentine) où des stalactites de rhodochrosite sont exploitées comme pierres semi précieuses. Dans d'autres gisements, la rhodochrosite trouvée en aval des minerais oxydés ne serait-elle pas de cémentation ? Cette question, d'une certaine importance économique, mérite d'être examinée attentivement.

IV.- CREATION DE GISEMENTS PAR PROCESSUS SUPERGENES ?

Laissons de côté le cas bien connu des gisements résiduels de bauxites, fer latéritique, nickel oxydé. Dans les exemples examinés jusqu'à présent, l'altération supergène paraît se développer à partir de gisements préexistants plus pauvres : cette interprétation est assez bien étayée pour les gisements stratiformes de cuivre et de manganèse pour lesquels on retrouve en général suffisamment de reliques inaltérées du minerai primaire (4); elle l'est moins pour les gisements discordants de Kipushi et Broken Hill (Zambie). Aussi bien en arrive-t-on à se poser la question : l'altération supergène peut-elle créer des gisements de toutes pièces, sans concentration initiale autre qu'une faible anomalie géochimique d'assez large étendue ? Durant les deux dernières décennies un certain nombre d'observations sur gîtes ont été interprétées en ce sens. Examinons-les.

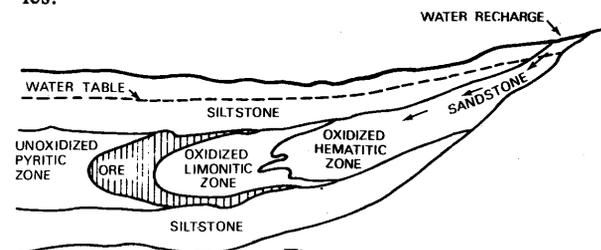


Figure 2

(4) En l'absence de drains fissuraux discordants, le cuivre est resté canalisé dans les horizons primaires de dépôt; les analogies séquentielles avec les Kupferschiefer permettent d'interpréter le dépôt primaire du cuivre comme synsédimentaire.

ROLLS URANIFERES

Le modèle peut en être pris dans le Wyoming. L'uranium est concentré sur un front présentant en coupe une forme de croissant (fig. 2). Ce front, cantonné dans un grès perméable encadré de siltstones, sépare une zone amont oxydée d'une zone aval réduite. La circulation des eaux est superficielle du type nappe perchée, tout au moins dans le cas du Southern powder river basin (DAHL & HAGMAIER, 1974). La progression des rolls se fait de l'amont vers l'aval; les déséquilibres de radioactivité mesurés sur certains gisements (DOOLEY *et al.*, 1964) montrent même que le déplacement de l'uranium est actuel (excès de radium dans la partie concave amont du croissant); les zonalités observées - vanadium, selenium, uranium, molybdène - sont bien en accord avec les diagrammes Eh-pH pour une circulation d'eau à Eh progressivement décroissant (HARSHMAN, 1974). La réalité du mouvement du front réactionnel est encore attestée par l'observation (HARSHMAN, 1974) des concentrations maximales d'uranium aux points de rebroussement du front les plus à l'aval dans la circulation envisagée. L'anomalie géochimique en uranium à l'origine de ces gisements n'est pas claire : le plus simple est d'envisager le lessivage des grès porteurs à l'amont du roll (5) dont la teneur géochimique mesurée à l'aval du roll avant lessivage paraît faible (2 à 6 ppm). DAHL & HAGMAIER (1974), indiquent des anomalies en uranium dans l'eau souterraine en amont du roll. Indépendamment du grès porteur, des tufs volcaniques surincombants peuvent être envisagés comme zone source. De toute manière la teneur de la zone source doit être effectivement très faible.

GISEMENTS DE PLOMB EN ALLUVIONS ARKOSIQUES

A partir d'observations à l'échelle du terrain et à celle du microscope, J.-M. SCHMITT & M. THIRY (1977) ont pu proposer une interprétation du gisement de plomb de Zeïda (Maroc) combinant latéritisation et céméntation, qui fait appel à la fois à l'hydrolyse des silicates et à l'oxydation de minéraux réducteurs. La circulation des eaux impliquée par le dispositif comprend, outre un lessivage en subsurface le long des versants, un déplacement kilométrique en nappe alluviale : la minéralisation est en effet étroitement contrôlée par des chenaux arkosiques : elle occupe dans ces chenaux une position précise au sein d'une séquence chimico-minéralogique interprétée comme profil paléopédologique tropical (fig. 3). La zone source serait un granite à 150 ppm de plomb. L'étranglement très poussé assure la concentration en dépit de l'exiguïté de la zone source.

Parmi les éléments remarquables de ce travail, il faut noter encore à la base de la séquence d'altération le nourrissage du feldspath potassique, détruit à l'amont. Ainsi l'altération supergène, par les déséquilibres chimiques qu'elle entraîne, est-elle susceptible de développer à basse température des minéraux normalement stables à des températures beaucoup plus élevées.

MINERALISATIONS EN MILIEU KARSTIQUE

Les publications sur les minéralisations en milieu karstique - principalement plombo-zincifères - ont été particulièrement nombreuses depuis les 20 dernières années. LAGNY & ROUVIER (1976) en ont donné une synthèse à laquelle le lecteur voudra bien se reporter. Par rapport aux travaux anciens l'élément le plus nouveau est l'évidence de stalactites dans lesquelles sont engagés des sulfures de plomb et zinc (par ex. LELEU & MORIKIS, 1967, ROUVIER, 1971). Il y a donc des sulfures de plomb et zinc formés par l'action des eaux descendantes. L'interprétation thermo-chimique de tels dépôts a été faite par M. LELEU (1969). Le modèle le plus élaboré de formation de ces gisements (A. BERNARD, 1977) se réfère au circuit karstique superficiel (CVIJIC, 1918) : le dépôt des sulfures s'effectue en queue de circuit dans la zone noyée proche des grandes vallées drainantes, à partir d'une zone source initialement contenue dans les roches sédimentaires carbonatées soumises à la karstification : en somme ce serait un remaniement supergène de céméntation à partir d'une anomalie géochimique.

La plupart des auteurs, se fondant sur des indices d'émersion dans la série encaissantes, estiment que la karstification et les minéralisations associées sont anciennes, pratiquement subcontemporaines de la série stratigraphique encaissante. Certes il y a des karstifications anciennes bien prouvées dans des séries carbonatées minéralisées (par ex. Trias moyen et supérieur des Dolomites, CROS & LAGNY, 1969); Trias des Malines, ORGEVAL, 1976). Mais en règle générale, il y a aussi dans ces roches un système karstique en activité, très visible avec des vides en cours de remplissage (v. par ex. les photos de ROUVIER, 1971) qui permettent de saisir sur le vif la sédimentation

(5) Des données existent dans la littérature (v. notamment HARSCHMAN, 1972) indiquant que les grès amont sont plus riches que les grès aval et donc ne peuvent avoir servi de zones sources. En l'absence de plans d'échantillonnage, je pense que ces teneurs fortes à l'amont traduisent la queue du gîte en cours de déplacement comme l'indique par ailleurs le déséquilibre de radioactivité. Des échantillons plus éloignés du gîte devraient accuser des teneurs plus faibles.

détritique et chimique intrakarstique. J'ai été frappé à la mine de l'Imini (Maroc) par la facilité avec laquelle un remplissage karstique subactuel pouvait être pris pour des niveaux détritiques intra série karstifiée. Les dissolutions karstiques suivent souvent les joints stratigraphiques et déterminent alors des grottes extrêmement plates et minces. Ce n'est qu'avec des galeries se recoupant à angle droit que j'ai pu observer la ferme-

ture latérale des remplissages stratoïdes de ces vides et l'examen attentif d'une grande longueur de couronnes de galeries que j'ai pu découvrir les cheminées d'alimentations du matériel détritique karstique, discordantes sur la série.

Aussi, contrairement à ce que pensent LAGNY & ROUVIER (1976), les dissolutions intrastratales doivent-elles être, à mon avis, très fréquentes, mais

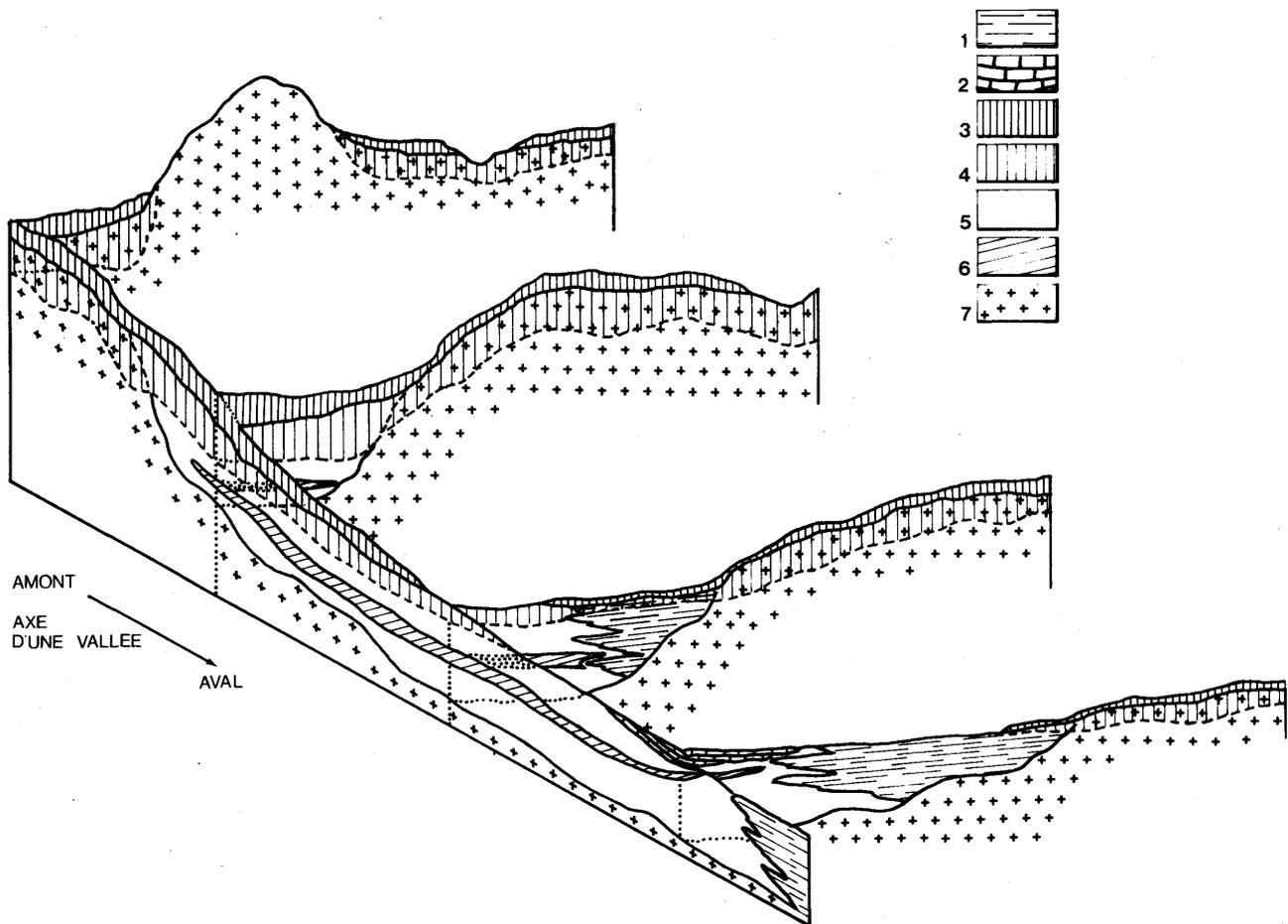


Figure 3.- Structure géologique de l'environnement du gisement de Zeïda, Maroc, d'après SCHMITT & THIRY, 1977

1. argilites rouges - 2. encroûtement calcaire - 3. cuirasse ferrugineuse
4. zones à argiles - 5. zones silicifiées - 6. zones minéralisées - 7. granite

passer inaperçues. Si j'insiste sur cette karstification actuelle, c'est que les minéralisations plombo-zincifères ne paraissent pas cantonnées seulement dans les paléokarsts; elles remplissent aussi et surtout des karsts plus récents, par exemple clairement sous couverture (ORGEVAL, 1976; VOIRIN, 1962).

Du point de vue des minéralisations, la différence de nature minéralogique entre diverses parties d'un gîte en milieu karstique a été souvent présentée comme une indication en faveur de plusieurs âges successifs dans la mise en place des minéralisations (par ex. LELEU, 1966 et 1969; VERRAES, 1979). Ces différences, ramenées à l'essentiel et en faisant la part des irrégularités liées au régime karstique, permettent de définir trois minerais :

1. un minerai oxydé comprenant principalement hydroxydes de fer, smithsonite, césurite en proportions variables;
2. un minerai sulfuré à blende et galène dominantes, généralement plus pauvre en fer, que sa structure permet d'interpréter comme supergène;
3. un minerai sulfuré à blende, galène, pyrite, non toujours observable et dont la mise en place prête à discussion.

Elles me paraissent correspondre à deux processus métallogéniques successifs :

- un premier processus déterminant la mise en place d'un minerai primaire, correspondant au 3e type retenu plus haut;
- un second processus d'altération supergène qui développe dans le même temps à la fois le minerai oxydé et le minerai sulfuré supergène.

Ces deux derniers minerais sont étroitement complémentaires : c'est l'oxydation de la partie supérieure qui permet la mise en solution des cations métalliques nécessaires au dépôt sulfuré supergène et qui abaisse le potentiel d'oxydo-réduction des eaux de pluies au néccaire à la précipitation des sulfures. De fait les minerais sulfurés clairement supergènes sont toujours associés spatialement à des minerais oxydés.

Si aucune relique du minerai primaire n'est visible, - ce qui est tout à fait possible si le phénomène d'altération supergène a pu se développer profondément - la logique géochimique du déplacement supergène conduit à chercher la trace de celui-ci au niveau des minerais oxydés, qui sont les moins déplacés, les plus résiduels. Cherchons à appliquer cette logique à la théorie proposée par A. BERNARD et rappelée plus

haut : retrouve-t-on des traces d'oxydation dans la masse des massifs carbonatés ? Il ne semble pas, les calcaires sont imperméables dans leur masse. En amont des gisements sulfurés, on ne retrouve des oxydations plus ou moins ferrugineuses que dans certains horizons dolomitiques et dans les fractures, c'est-à-dire dans le prolongement direct des minerais exploités. Le remaniement supergène paraît localisé. Le volume primaire doit être faible, du même ordre de grandeur que celui du minerai secondaire (et primaire) défini par l'exploitation. L'absence de réduction de volume dans le déplacement supergène implique, si l'on effectue le bilan métal, que la teneur initiale primaire soit relativement forte.

*
* *

Ainsi, en définitive, les processus supergènes ne paraissent pas créateurs de gisements à partir d'anomalies géochimiques, dans le cas des minéralisations plombo-zincifères en milieu carbonaté (6), ce qui laisse entier le problème de la genèse de ces concentrations. Par contre sont efficaces certains processus de type latéritique rassemblant dans d'étroits chenaux une anomalie géochimique lessivée sur une large surface (cas du plomb type Zeïda) ou le dispositif roll uranifère caractérisé par un très fort gradient de dépôt (7).

V.- CONCLUSIONS

Il m'est agréable de dédier ces réflexions à la mémoire du Professeur Paul BARTHOLOME qui a insisté de nombreuses fois (1958, 1962, 1963, 1969, *et al.* 1972, 1974) avec de multiples arguments sur le caractère tardif de la cristallisation des minéraux cuprifères dans les gisements stratiformes du Shaba, dont il percevait en même temps le caractère synsédimentaire. En particulier, dans sa note de 1963 à Prague, Paul BARTHOLOME avait magistralement posé le problème, dont les données de l'hydrogéologie moderne permettent aujourd'hui d'entrevoir la solution.

Encore qu'il puisse y avoir des exceptions (par ex. Zeïda), le caractère vivant du phénomène mérite d'être souligné. Actuellement sur les sites terrestres minéralisés subaffleurant, tous les éléments nécessaires au développement du processus d'altération supergène sont

(6) *Kipushi et Broken Hill (Zambie) se rattachent à ce cas.*

(7) *Voir la définition de ce terme dans PELISSONNIER (1965).*

en place : eaux de pluie chargées d'oxygène, dont la circulation en profondeur peut être démontrée par des mesures hydrogéologiques, percolant à travers des sulfures visibles puisqu'on les exploite. Même à Zeïda sont en jeu des réactions actuelles : l'oxydation de la galène en cérusite. Si le caractère vivant peut être appréhendé de manière spectaculaire dans certains cas (déséquilibre dans les chaînes radioactives, potentiel électrique spontané en surface), on manque encore cruellement de critères, notamment microscopiques pour en cerner les limites. La remarque de LOVERING (1934) - "galena is tacitly assumed to be primary unless there is strong evidence to the contrary" - garde toute sa valeur et peut être étendue à beaucoup d'autres minéraux. Par exemple je suis frappé dans certains gîtes à protore riche en énargite de la coexistence d'une covellite supergène et d'une covellite hypogène (Bor, DROVENIK, 1953 in RAGUIN, 1961; Butte, SALES & MEYER, 1949; Mi Vida, KOUKHARSKY & MIRRE, 1976). Or la covellite hypogène n'est pratiquement signalée que dans ces gîtes-là. Pourquoi n'apparaît-elle que dans des gîtes à covellite supergène ? Pourquoi n'y aurait-il pas deux faciès supergènes de covellite, de même que dans des paragenèses hydrothermales il peut y avoir deux faciès d'un même minéral positionnés différemment dans une même série isomorphe (par ex. deux grenats dans les skarns à scheelite de Costabonne (GUY, 1979) ?

Pour caractériser des sulfures supergènes et poser les bases de leurs rapports avec la minéralisation primaire, une règle me paraît toutefois se dégager des analyses précédentes : à chaque minéralisation sulfurée supergène se rattache une minéralisation oxydée qui témoigne le mieux de la position spatiale de la minéralisation primaire. D'une manière imagée qui rende compte de la nature du processus concentrateur, je propose qu'on qualifie ces gisements sulfurés supergènes, de *semi-résiduels*.

Il faut en outre attirer l'attention sur l'impact économique de ce caractère vivant des concentrations : proches de la surface topographique et donc accessibles à l'homme, mais en même temps promises à disparaître en profondeur.

Par ailleurs on notera les convergences dans les effets des processus physico-chimiques de percolation dans les terrains, qu'ils soient de haute ou de basse température. Pour les uns et pour les autres, le schéma de KORZHINSKII dont Paul BARTHOLOME avait saisi toute l'importance, représente une approximation qui a le mérite de faire prendre conscience de l'enchaînement des zonalités.

D'une manière plus précise, l'analyse précédente rappelle le caractère exclusivement supergène des minerais manganésifères oxydés riches, confirme les travaux récents en faveur d'un enrichissement supergène sulfuré du plomb et du zinc et suggère que l'enrichissement supergène sulfuré bien démontré pour les gisements cuprifères discordants - filoniens ou multifissurés - s'applique, à une échelle insoupçonnée jusqu'ici, aux gisements de cuivre stratiformes du Shaba et de Zambie.

BIBLIOGRAPHIE

- ADLER, H.H., 1974. Concepts of uranium ore formation in reducing environments in sandstone and other sediments. In : Proc. Symp. "Formation of uranium ore deposits". Athens, Int. Atom. Energy Agency, Wien : 141-168.
- BANCROFT, J.A., 1929. Notes on the geology of N'Kana Mine. In : Int. Geol. Congr. XV Session South Africa. Guide Book Exc., C 22 : 23-28.
- BARTHOLOME, P., 1958. On the paragenesis of copper ores. *Studia Universitatis Lovanium. Fac. Sc.*, 4.
- BARTHOLOME, P., 1962. Les minerais cuprocobaltifères de Kamoto, Katanga-Ouest. I Pétrographie, II Paragenèse. *Studia Universitatis Lovanium*, 14 : 16.
- BARTHOLOME, P., 1963. Sur la zonalité dans les gisements du Copperbelt de l'Afrique centrale. Symposium: Problems of post-magmatic ore deposition, Prague, 1 : 317-321.
- BARTHOLOME, P., 1969. White Pine et Kamoto, deux gisements stratiformes de cuivre. *Acad. Royal Sci. Outremer. Bull. des séances (Bruxelles)* : 397-410.
- BARTHOLOME, P., 1974. On the diagenetic Formation of ores in sedimentary beds, with special reference to Kamoto, Shaba, Zaïre. Centenaire de la Soc. Geol. Belgique, gisements stratiformes et provinces cuprifères, Liège : 203-213.
- BARTHOLOME, P., EVRARD, P., KATEKESHA, F., LOPEZ-RUIZ, J. & NGONGO, M., 1972. Diagenetic Ore-forming Processes at Kamoto, Katanga, Republic of the Congo. In : *Ores in Sediments G.C. AMSTUTZ & A.J. BERNARD* édit. Springer Verlag Berlin, Heidelberg, New York : 21-41.
- BEAUDOIN, B., LESAVRE, A. & PELISSONNIER, H., 1976. Action des eaux superficielles dans le gisement de manganèse d'Imini (Maroc). *Bull. Soc. Géol. France* (7), XVIII (1) : 95-100.
- BERNARD, A., 1977. Quelques réflexions sur la genèse des gisements du type "Vallée du Mississipi". *Sci. Terre, Nancy*, XXI (3) : 271-302.
- BRIART, G., 1948. Le gisement de Kipushi. Rapport Union Minière du Haut-Katanga (inédit).

- CAMUS, F., 1975. Geology of the El Teniente Orebody with Emphasis on Wall-Rock Alteration. *Eco. Geol. Lancaster*, 70 : 1341-1372.
- CROS, P., & LAGNY, P., 1969. Paléokarsts dans le Trias moyen et supérieur des Dolomites et des Alpes Carniques occidentales. Importance stratigraphique et paléogéographique. *Sc. Terre Nancy*, XIV (2) : 139-195.
- CVIJIC, J., 1918. Hydrographie souterraine et évolution morphologique du karst. *Trav. Inst. Géogr. Alp. Univ. Grenoble*, 6-4 : 375-427.
- DAHL, A.R. & HAGMAIER, J.L., 1974. Genesis and characteristics of the southern Powder River Basin uranium deposits, Wyoming, U.S.A. In : *Proc. Symp. "formation of uranium ore deposits"*. Athens Int. Atom. energy agency, Wien : 201-218.
- DOOLEY, J.R. jr., TATSUMOTO, M. & ROSHOLT, J.N., 1964. Radioactive disequilibrium studies of roll features, Shirley basin, Wyoming. *Econ. Geol. Lancaster*, 59 : 586-595.
- DOYEN, L., 1974. Etude métallogénique des gisements de manganèse de Kisengué Kamata-Kapolo, Shaba, Zaïre. Thèse Doct. ès Sc. Université Libre Bruxelles, I : 493 pp.
- DROVENIK, M., 1953. Oizvoru Rudnih mineralov v Boroken Rudniku (Thèse). Ljubljana.
- FLEISCHER, V.D., GARLICK, W.G., & HALDANE, R., 1976. Geology of the zambian copperbelt. In : *Hand book of Strata-bound and Stratiform ore deposits*. K.H. WOLF edit., 6 : 223-352.
- FONTEILLES, M., 1978. Les mécanismes de la métasomatose. *Bull. Mineral.*, 101 : 166-194.
- GRANDIN, G & PERSEIL, E.A., 1977. Le gisement de manganèse de Mokta (Côte d'Ivoire). Transformations minéralogiques des minerais par action météorique. *Bull. Soc. Géol. France* (7), XIX : 309-317.
- GUSTAFSON, L.B. & HUNT, J.P., 1975. The porphyry copper deposit at El Salvador, Chile. *Econ. Geol. Lancaster*, 70 : 857-912.
- GUY, B., 1979. Pétrologie et géochimie isotopique (S, C, O) des skarns à scheelite de Costabonne, Pyrénées Orientales, France.
- HARSHMAN, 1972. Uranium Rolls in the United States. *The Mountain geologist*, Denver, 9(2-3) : 135-141.
- HARSHMAN, 1974. Distribution of elements in some roll-type uranium deposits. In : *Proc. Symp. Athens, "Formation of uranium ore deposits"*. Int. Atom. energy agency, Wien : 169-183.
- INTIOMALE, M.M. & OOSTERBOSCH, R., 1974. Géologie et géochimie du gisement de Kijushi, Zaïre. In : *gisements stratiformes et provinces cuprifères*. Centenaire Soc. Géol. Belgique, Liège : 123-164.
- KORZHINSKII, D.S., 1970. *Theory of metasomatic zoning*. Clarenton Press, Oxford, 162 pp.
- KOUKHARSY, M. & MIRRE, J.C., 1976. Mi Vida prospect : a porphyry copper-type deposit in North western Argentina. *Econ. Geol.*, Lancaster, 71 : 849-863.
- LAGNY, P. & ROUVIER, H., 1976. Les gisements Pb-Zn en roches carbonatées sous inconformité : gisements paléokarstiques ou gisements dans des paléokarsts ? In : *Métallogénie et Géologie Minière*. Mém. h. sér. Soc. Géol. France, 7 : 57-69.
- LAMBERT, A., 1979. La colonne échangeuse d'ions : Un modèle pour la genèse de certains gîtes stratiformes de cuivre. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, 101 : 85-91, 1978.
- LAUNAY, L. de, 1913. *Traité de métallogénie - Gîtes minéraux et métallifères*, I : 855 pp.
- LELEU, M., 1966. Les gisements plombo-zincifères du Laurium (Grèce). *Sci. Terre*, Nancy, XI(3) : 293-343.
- LELEU, M., 1969. Essai d'interprétation thermodynamique en métallogénie : les minéralisations karstiques du Laurium (Grèce). *Bull. Bur. Rech. Géol. Min.*, 2e série, sect. II(4) : 1-62.
- LELEU, M. & MORIKIS, A., 1967. Sur des sulfures de basse température aux mines du Laurium (Attique). *Bull. Soc. Fr. Miner. Cristallogr.*, XC : 241-245.
- LINDGREN, W., 1933. *Mineral deposits*, Fourth Edit. Mc Graw Hill, New York et London, 930 pp.
- LOVERING, T.S., 1934. Geology and ore deposits of the Breckenridge mining district, Colorado U.S. *Geol. Surv. Prof. paper* 176 : 64 pp.
- Mc KINNON, D. & SMIT, N.J., 1961. N'Changa, In : "The Geology of the Northern Rhodesian Copperbelt." F. Mendelsohn edit. : 234-274.
- MELIDONIS, N., 1963. (en grec). La géologie de l'île Anaphi, Mer Egée, Grèce, Athènes, 308 pp.
- NICOLINI, P. & TROLY, G., 1962. Stratégie de la prospection des minerais de cuivre en Rhodésie du Nord. *Rapport Bur. Rech. Géol. Min.*, inédit, 15 pp.
- OOSTERBOSCH, R., 1962. Les minéralisations dans le système de Roan au Katanga. In : *Gisements stratiformes de cuivre en Afrique*, 1^{ère} partie Symposium Ass. Serv. Géol. Africains J. LOMBARD & P. NICOLINI, edit. : 71-136.
- ORGEVAL, J.-J., 1976. Les remplissages karstiques minéralisés : exemple de la mine des Malines (Gard, France). In : *Métallogénie et Géologie Minière*, Mém. h. sér. Soc. Géol. France, 7 : 77-83.
- PELISSONNIER, H., 1965. Le problème de la concentration naturelle des substances minérales. *Ann. Mines Paris*, décembre : 889-924.
- PELISSONNIER, H., 1978. Relations hydrodynamiques entre socles et bassins sédimentaires. Implications métallogéniques. *C.R. Acad. Sci. Série D*. 287 : 443-446.
- PLACET, J., 1975. Géologie du Shaba. Une évocation des principaux gîtes de cuivre plomb zinc uranium. Générale des Carrières et des Mines, départ. géologique, 291 pp.
- PLAT, R., 1977. Etude au microscope à réflexion de minerais du sondage KW 207, KAMBOVE, Zaïre. *Rapport inédit Sect. Etude Géol. Min. Ecole des Mines*, Paris, 7 pp.

- RACKLEY, R.L., 1972. Environment of Wyoming tertiary uranium deposits. *The Mountain geologist*, Denver, 9 (2-3) : 143-157.
- RAGUIN, E., 1961. Géologie des gîtes minéraux. 3e édit., Masson édit., Paris : 686 pp.
- ROBERT, M., 1946. Le Congo physique publié sous les auspices du Comité Spécial du Katanga. H. VAILLANT-CARMANNE, S.A. Impr. de l'Académie, Liège.
- ROUVIER, H., 1971. Minéralisation plombo-zincifères et phénomènes karstiques. Exemple tunisien : le gisement du Djebel Hallouf. *Mineral. Deposita*, Berlin, 6 : 196-208.
- SALES, R.H. & MEYER, C., 1949. Results from preliminary Studies of vein formation at Butte, Montana. *Econ. Geol.* New Haven, 44 : 465-484.
- SCARPELLI, W., 1973. The Serra do Navio manganese deposit (Brazil). In : *Genesis of Precambrian iron and manganese deposits*, UNESCO, Proc. Kiev. Symp. 1970 : 217-227.
- SCHMITT, J.-M. & THIRY, M., 1977. Minéralisation en plomb par évolutions pédogénétiques d'une série arkosique du Trias (Zeïda, Haute Moulouya, Maroc). *Bull. Bur. Rech. Geol. Min., Orléans*, II (2) : 113-133.
- SCHWELLNUS, J.E.G., 1961. Bancroft. In : *The Geology of the northern Rhodesian Copperbelt*. F. Mendelsohn edit. : 214-234.
- TAYLOR, J.H., 1958. The formation of supergene galena at Broken Hill, Northern Rhodesia. *Mineral. magazine*, XXXI : 908-913.
- VERRAES, G., 1979. Contribution à l'étude de la province métallogénique sous cévenole : les gîtes Pb-Zn de Montdardier, La Sanguinède et 102, district des Malines (Gard) France, Thèse Montpellier, 290 pp.
- VOIRIN, J., 1965. Géologie du gisement plombo-zincifère de Bou-Beker. In : *Colloque sur des gisements stratiformes de plomb, zinc et manganèse du Maroc*. Notes et mém. Service Géol. Maroc., Rabat, 181 : 21-68.
- WEBER, F., 1969. Une série précambrienne du Gabon : le Francévillien. *Sédimentologie, géochimie, relations avec les gîtes minéraux associés*. Thèse Strasbourg, 367 pp.
- WHYTE, W.J., 1968. Geology of the Broken Hill Mine, Zambia. in : *Symp. Gisements de Plomb-Zinc en Afrique*. Assoc. Serv. Géol. Africains, Tunis, 1966, P. NICOLINI edit. : 395-425.