

Altération supergène des protores à grenats manganésifères dans quelques gisements d'Afrique de l'Ouest

E. A. Perseil¹ et G. Grandin²

¹ Muséum d'Histoire Naturelle de Paris

² Ecole des Mines de Paris

Abstract. The wet tropical weathering of Precambrian spessartite quartzites leads to the formation of secondary oxidized ores. These ores result from different successions of superimposed elementary processes, among them:

- garnet hydrolysis: Mn, Ca, and Fe are leached, and only an amorphous, silicoaluminous phase remains.
- lithiophorite neoformation: Added manganese combines with alumina of the amorphous, Si-Al products.
- leaching: Voids appear in the central part of the weathered garnets. They may widen, leaving only the quartz matrix with polyhedric voids.
- epigenic replacement: The quartz is replaced by cryptomelane, while the garnets may remain unweathered.

The various ore types are characterized by the sequence of transformations and by the volumes that each transformation affects. These transformations are old because they are observed not only in situ ores but also in removed detrital ores. In the same way the major part of the accumulated stocks of oxidized ores must be old.

Résumé. L'altération météorique de quartzites à grenat spessartite précambriens conduit, sous des climats tropicaux humides, à la constitution de minerais oxydés secondaires. Ceux-ci résultent de la superposition, dans un ordre variable, de divers processus élémentaires, en particulier:

- hydrolyse des grenats: Mn, Ca, Fe sont éliminés et une phase amorphe silico-alumineuse subsiste seule.
- néoformation de lithiophorite: du manganèse importé se combine avec l'aluminium des produits amorphes silico-alumineux.
- lessivage: un vide apparaît au centre du grenat altéré et s'agrandit jusqu'à ne laisser subsister que la matrice de quartz piquetée de cavités polyédriques.
- épigénie par la cryptomélane: la gangue de quartz est remplacée par la cryptomélane, les grenats pouvant rester inaltérés.

Les divers types de minerai se distinguent par la séquence de transformations subies et par les volumes concernés par chacune d'elles. Observées dans les minerais remaniés en éluvions aussi bien que dans des minerais in situ, ces transformations sont anciennes comme l'essentiel des stocks accumulés de minerai oxydé.

Introduction

Dans le socle précambrien d'Afrique de l'Ouest (fig. 1), les terrains birrimiens volcano-sédimentaires plissés comportent des gîtes de manganèse stratiformes à basse teneur, dont les minéralisations primaires principales sont des carbonates ou des silicates obtenus par recristallisation métamorphique (Arnould 1954, Soulé de Lafont 1956, Servant 1956, Cance et al. 1958, Sorem et Cameron 1960, Delfour 1963, Bagarre 1963, Zanone 1968). L'altération météorique transforme ces minéralisations en oxydes secondaires. Elle a permis d'obtenir quelques gisements présentant un intérêt économique, lorsqu'ont été assurés, sous la dépendance des climats successifs et de l'évolution corrélative du relief, la constitution et la conservation de

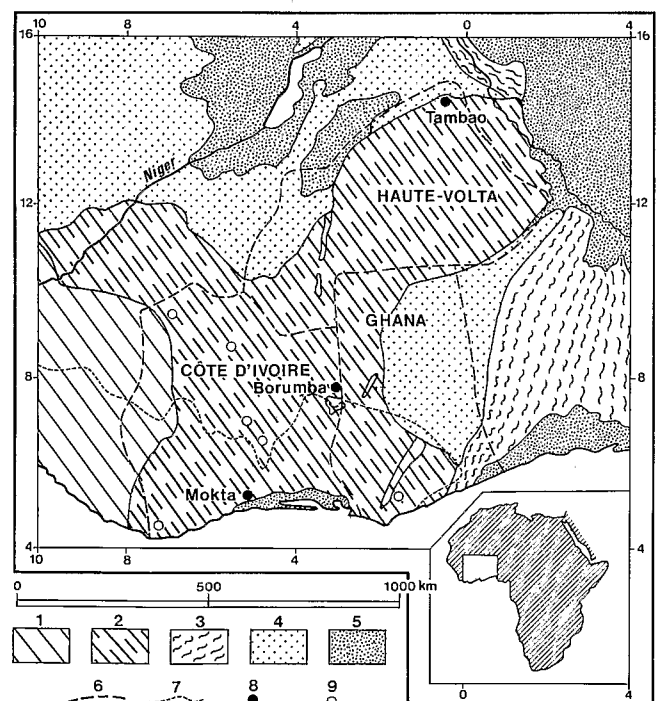


Fig. 1. Carte de situation. 1 Socle libérien précambrien inférieur, 2 Socle éburnéen précambrien moyen, 3 Chaîne panafricaine, 4 Couverture de plateforme, 5 Sédiments méso-cénozoïques dont le Continental Terminal, 6 Frontières, 7 Limite de la forêt dense, 8 Gisements étudiés, 9 Autres gisements ou gîtes



stocks suffisants de minerais oxydés, soit in situ à la partie supérieure des couches redressées, soit dans les sols sous forme d'amas de blocs et de cuirasses (Lelong et al. 1976). Les paragenèses oxydées montrent l'association de minéraux de transformation des protores, manganite et lithiophorite, à des minéraux de précipitation du manganèse en solution, pyrolusite et cryptomélane. Cette dernière fait partie, avec nsutite et ramsdellite, des formes les plus stables dans les conditions de la surface en milieu tropical (Perseil et Grandin 1978).

L'évolution des protores silicatés, constitués principalement de quartzite à grenat spessartite, suit des voies plus diverses que celle des protores de rhodocrosite. Elle fait place à l'épigénie à côté de l'hydrolyse, au lessivage à côté du dépôt, dans un matériau dont la structure initiale s'efface lentement. Deux gîtes de Côte d'Ivoire, Mokta près de Grand Lahou dans la zone forestière du Sud (un million de tonnes produites entre 1960 et 1970) et Borumba dans la savane arborée du nord-est (réserves trop faibles pour une exploitation), ont fourni une gamme de minerais enrichis ou appauvris présentant, dans un même échantillon, la superposition de plusieurs phénomènes d'altération. Ils donnent l'occasion d'étudier les modalités de l'altération des grenats.

Quelques échantillons du gisement de Tambao, dans la région sahélienne du nord de la Haute-Volta, ont été adjoints; ils proviennent de bancs de minerai à grenat, marginaux dans ce gisement dont les réserves (12 millions de tonnes) dérivent principalement d'un protore de rhodocrosite massive.

Les minéralisations primaires

Les protores, dont la teneur en manganèse métal est de 10 à 20%, forment des couches interstratifiées de fort pendage, souvent sub-verticales, dont l'allongement atteint quelques centaines de mètres horizontalement et la puissance quelques mètres (exceptionnellement 6 m pour la "lentille sud" de Mokta). Ils sont constitués de petits grenats aux formes polyédriques généralement nettes, dans une gangue de quartz finement grenu pouvant contenir une proportion variable de séricite. Dans certaines minéralisations de Borumba, le ciment de quartz forme de grandes plages centimétriques monocristallines qui englobent de multiples grenats, en une texture poecilitique. La proportion de grenat est variable, parfois au sein d'un même échantillon où se succèdent des strates minces plus ou moins riches en grenats. Ceux-ci peuvent être isolés les uns des autres ou adjacents, formant des amas de grenatite ne laissant au quartz que quelques interstices.

Le diamètre des grenats est inférieur à $0,5 \text{ mm}^1$ et le plus souvent de quelques dizaines de microns: 20 à 60μ pour l'échantillon SS 65 de Mokta, 5 à 50μ pour l'échantillon HV 16 de Tambao. Il varie assez largement dans un même gisement, avec à Borumba des grenats de 8 à 20μ pour l'échantillon EE 1 (fig. 2a), de l'ordre de 100μ pour EE 29 b et de 0,1 à 0,4 mm pour EE 29 a. Pour ces deux derniers échantillons, ce sont surtout des produits de transformation ou des cavités de lessivage qui sont ob-

servés à la place des grenats initiaux et le diamètre de ceux-ci pouvait être légèrement inférieur.

Dans ces grenats manganésifères des quantités variables de calcium sont présentes ainsi que du fer, noté en lames minces par des passées où les grenats sont teintés de brun et associés dans les premières étapes d'altération à de la goethite. Les analyses à la microsonde et le calcul des rapports molaires mettent en évidence la part dominante du pôle spessartite et la part variable du pôle grossulaire, jusqu'à 19% pour les grenats de Tambao, ne dépassant pas 7,5% pour les grenats de Mokta (tableau 1). L'almandin est en proportion inverse au grossulaire, le pyrope mineur et le calcul fait parfois apparaître l'andradite, ce qui correspond théoriquement aux cas où le rapport massique $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ s'élève au-dessus de 1,76. (Les proportions d'almandin et d'andradite sont confirmées par le calcul de l'équilibre des charges).

De fines inclusions de sulfures sont observées en section polie dans certains grenats, ce qui s'accorde avec les teneurs assez élevées de cuivre, cobalt ou nickel apparues dans quelques-unes des multiples analyses ponctuelles.

Des analyses ont été faites en périphérie et au cœur des grenats pour contrôler l'existence éventuelle d'une zonalité primaire. Des différences ont été notées, sur les teneurs en fer et en calcium, avec plus de fer au centre et plus de calcium en périphérie, mais elles vont de pair avec un éloignement du champ des compositions du grenat, par de légers déficits en silice. Elles seraient donc la marque d'un début d'altération. Curieusement ce sont les grenats englobés dans la cryptomélane secondaire qui se révèlent les plus sains, avec un rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ proche de 1,67 et sans variations du centre à la périphérie.

En fait, nos échantillons, prélevés dans les travaux de reconnaissance ou d'exploitation de minerais supergènes, ne font connaître le protore que par des reliques où l'altération, bien qu'inapparente à l'observation microscopique, a commencé son oeuvre, ne permettant pas d'interpréter avec certitude les zonations lorsqu'elles sont indiquées par l'analyse ponctuelle. De plus les grenats les plus gros sont les premiers altérés et l'étude des minéraux sains tend à sélectionner les grenats de petite taille.

Hydrolyse des grenats

Altération centrifuge (photos a et b)

Les grenats perdent progressivement leur manganèse, puis leur calcium et leur fer, tandis que les teneurs relatives de silice et d'alumine augmentent. Une zonation apparaît (éch. EE 15, 25, SS 68, HV 45): le cœur du grenat est transformé en un matériau isotrope silico-alumineux tandis que la périphérie conserve les caractères du grenat (tableau 2). Au stade plus avancé, la couronne de grenat s'amincit et peut disparaître, le grenat est alors entièrement remplacé par le matériau silico-alumineux. Il est remarquable que la composition de celui-ci soit relativement homogène, pour des échantillons provenant de gîtes séparés par plusieurs centaines de kilomètres et correspondant aussi bien à des minerais en place à plus de 10 m sous la surface topographique (Mokta) qu'à des éluvions superficielles anciennes (Borumba).

De 1,76 pour les grenats spessartite, grossulaire ou almandin, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ passe à 1,2 ce qui cor-

¹ Des grenats de plus grande taille existent dans les gîtes de la région de Korhogo (Côte d'Ivoire) qui comportent peu de minerais oxydés. Ils atteignent 1 mm à Dassoumbé et 3 mm à Lagnokaha

Tableau 1. Composition initiale des grenats. 1,2,3: Mokta (SS68) grenats de 40 µ – 4,5,6: Tambao (HV16) – 7,8,9: Borumba (EE9) grenats de 10 à 20 µ – 10,11: Borumba (EE1)

	1	2 (centre)	3 (périph)	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂	37,07	37,95	37,33	37,11	36,88	37,32	38,72	37,57	37,71	37,40	36,68
Al ₂ O ₃	21,64	21,03	21,88	22,00	21,80	20,40	21,25	22,17	21,94	21,63	21,34
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	(1,71)	(1,80)	(1,70)	(1,68)	(1,69)	(1,82)	(1,82)	(1,69)	(1,71)	(1,72)	(1,71)
MnO	37,17	34,14	35,06	31,04	30,18	31,13	33,31	34,28	33,95	34,32	33,65
FeO	2,69	2,61	2,57	2,40	3,01	2,96	1,40	3,87	1,38	2,22	1,43
CaO	1,88	2,36	1,78	6,02	6,41	5,89	5,18	2,39	5,39	4,41	5,75
MgO	0,27	0,32	0,27	0,51	0,78	0,75	0,08	0,70	0,01	0,10	–
Na ₂ O	–	–	–	0,05	–	–	–	0,08	0,01	0,05	–
K ₂ O	–	–	–	–	0,02	1,25	–	0,06	–	–	–
CuO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
CoO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
NiO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,07	0,11
TiO ₂	–	–	–	–	–	–	–	–	–	0,31	0,14
Total	100,72	98,41	98,89	99,13	99,08	99,70	99,94	101,12	100,39	100,51	99,10
Sp	87,09	84,77	86,92	74,07	70,77	74,26	80,50	80,93	80,55	81,57	79,61
Gr	5,56	7,43	5,59	18,16	19,02	14,53	15,82	7,15	16,19	12,24	16,78
Al	6,22	6,41	6,29	5,65	6,97	4,82	3,33	9,02	3,22	5,19	3,33
Py	1,13	1,39	1,20	2,13	3,24	3,15	0,34	2,91	0,04	–	–
AD	–	–	–	–	–	3,23	–	–	–	–	0,26

Tableau 2. Alteration centrifuge des grenats en produits amorphes silico-alumineux

	EE 15: grenats périphérie saine		EE 15: grenats coeur hydrolysé		EE 25: grenats coeur hydrolysé		EE 25: grenats coeur hydrolysé		EE 25: grenats coeur hydrolysé		EE 25: grenats coeur hydrolysé	
SiO ₂	37,62	37,48	37,23	46,97	46,97	47,88	48,73	46,54	43,37	44,91	45,62	45,62
Al ₂ O ₃	21,24	21,19	21,36	38,97	39,85	40,08	40,18	38,05	34,70	36,11	37,62	37,62
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	(1,77)	(1,77)	(1,74)	(1,21)	(1,18)	(1,19)	(1,21)	(1,22)	(1,25)	(1,24)	(1,21)	(1,21)
FeO	1,51	1,91	1,44	0,11	0,27	0,16	0,28	0,89	1,77	1,14	0,05	0,05
MnO	35,88	35,03	37,16	0,92	0,98	0,73	0,64	1,00	0,57	0,30	1,02	1,02
CaO	2,67	3,23	2,58	0,06	0,06	0,08	0,07	–	–	–	–	–
MgO	0,42	0,39	0,40	0,05	–	0,06	–	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05	<0,05
Cr ₂ O ₃	0,05	0,01	0,10	–	–	–	–	–	–	–	–	–
	99,39	99,24	100,27	87,08	88,13	88,99	89,90	86,48	80,41	82,46	84,31	84,31

Tableau 3. Echantillon EE 15 – début d'altération sans modification d'aspect

	couronne d'un grenat à coeur hydrolysé	grenats apparemment sains				
SiO ₂	37,61	36,94	36,62	35,29	34,58	34,58
Al ₂ O ₃	22,39	22,42	22,63	21,99	22,47	22,47
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	1,68	1,65	1,62	1,60	1,54	1,54
FeO	1,72	1,40	1,42	1,01	0,52	0,52
MnO	32,05	31,97	29,72	28,28	27,25	27,25
CaO	1,0	1,18	2,39	2,46	3,63	3,63
MgO	0,34	0,41	0,05	0,41	0,04	0,04
CuO	–	–	0,08	0,02	–	–

respond à un départ de silice. Le fait que la somme des éléments dosés soit très inférieure à 100 peut signifier que de l'eau est présente, les produits silico-alumineux étant des gels, mais il est également possible qu'elle soit liée à une porosité fine importante d'une association de produits amorphes.

Dans une même lame mince l'intensité de l'hydrolyse varie pour des grenats de même taille et la question se

pose de savoir si la composition initiale des grenats intervient à côté des possibilités de circulation préférentielle des solutions. L'analyse de grenats apparemment sains, situés à proximité de grenats présentant l'altération centrifuge (EE 15), a montré une composition anormale, pouvant s'éloigner plus de celle du grenat sain, que la composition de couronnes résiduelles, notamment lorsque la teneur en calcium est forte (tableau 3). L'altération centrifuge serait précédée d'une légère transformation de l'ensemble du grenat, et l'apparition de la zonation plus tardive dans les grenats plus calciques.

Altération centripète

Dans d'autres cas l'altération progresse à partir de la périphérie des grenats, par exemple dans des quartzites à petits grenats du pied des collines de Borumba (EE 1), où l'hydrolyse est limitée aux zones proches de fractures. Les grenats comportent soit un mince liseré périphérique discontinu, soit une couronne d'épaisseur variable de produits isotropes silico-alumineux (46–47% SiO₂, 38–40% Al₂O₃, 1–3% MnO) où la silice, notamment en bordure du

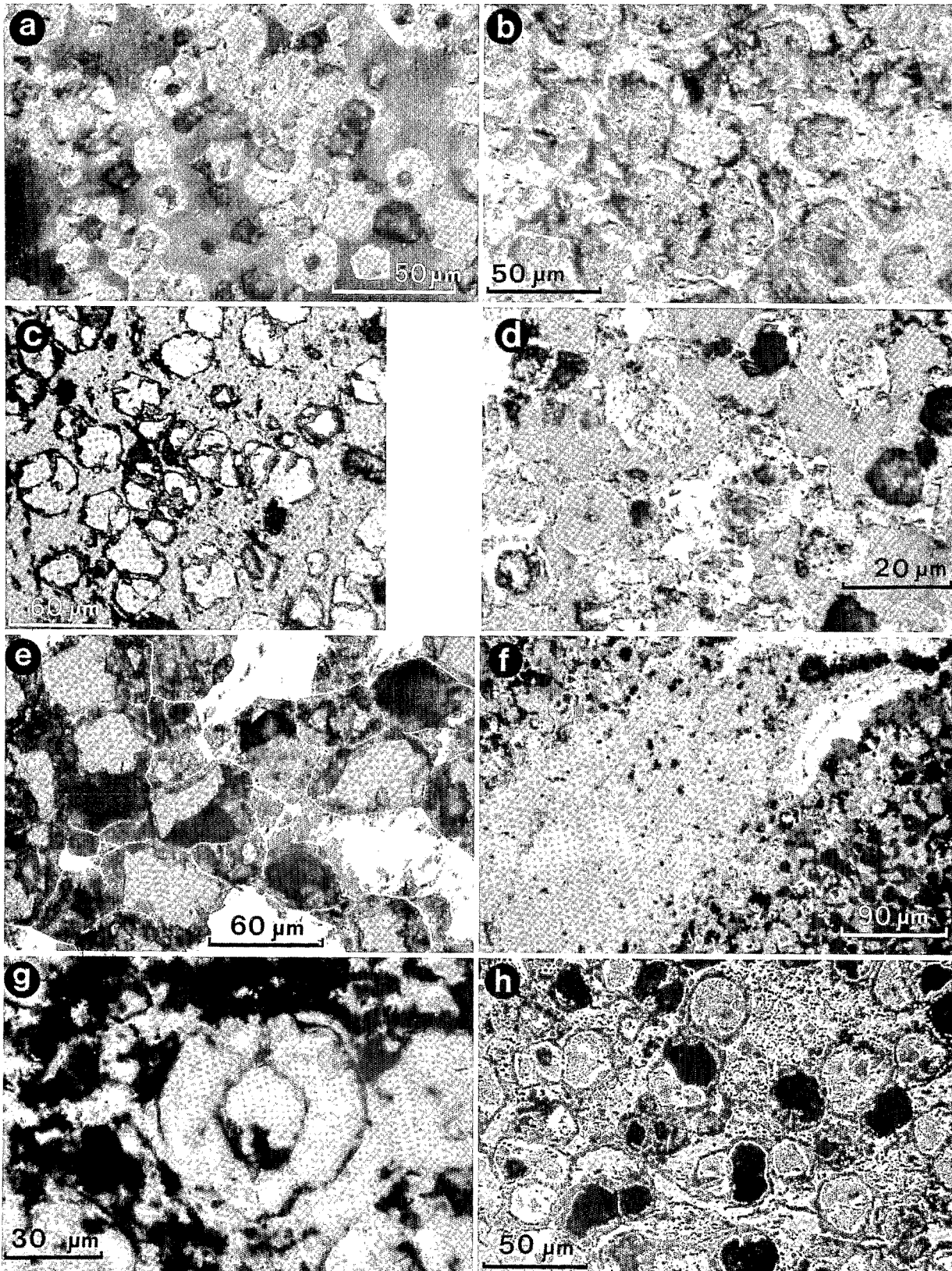
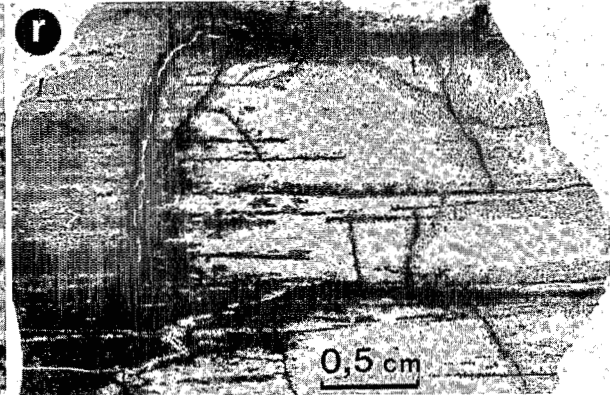
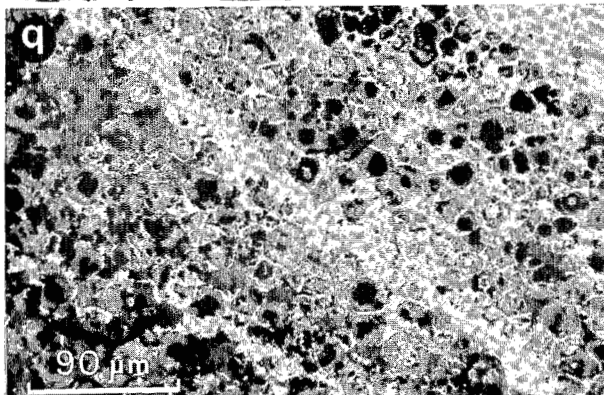
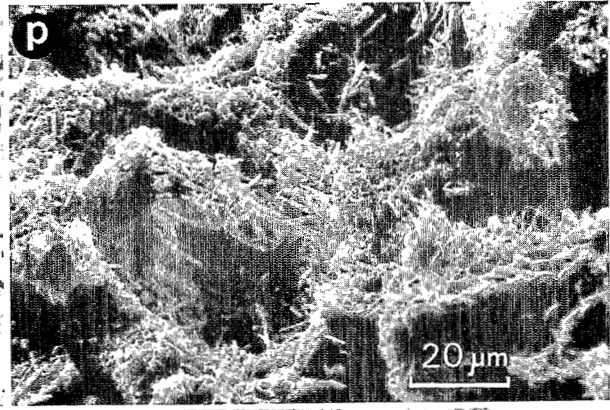
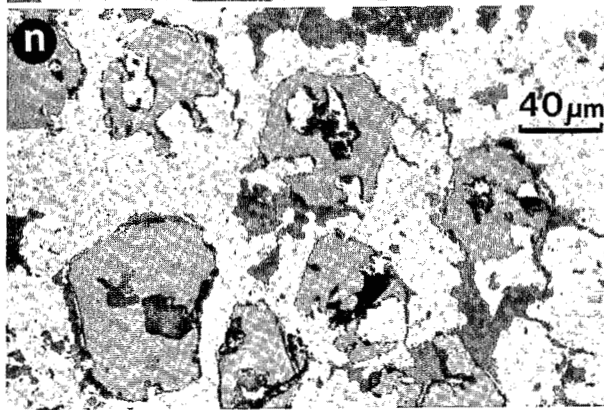
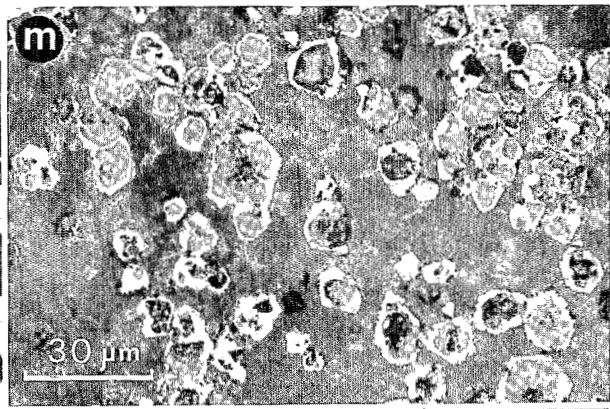
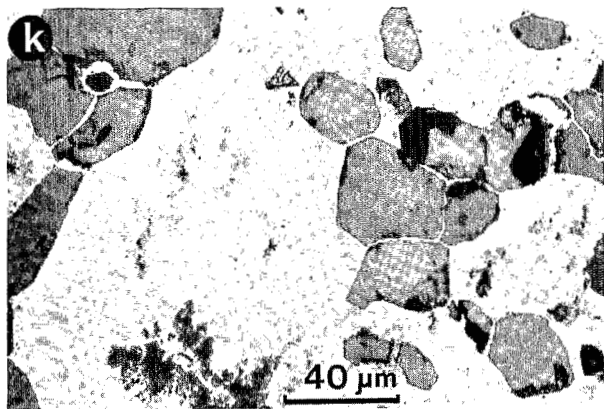
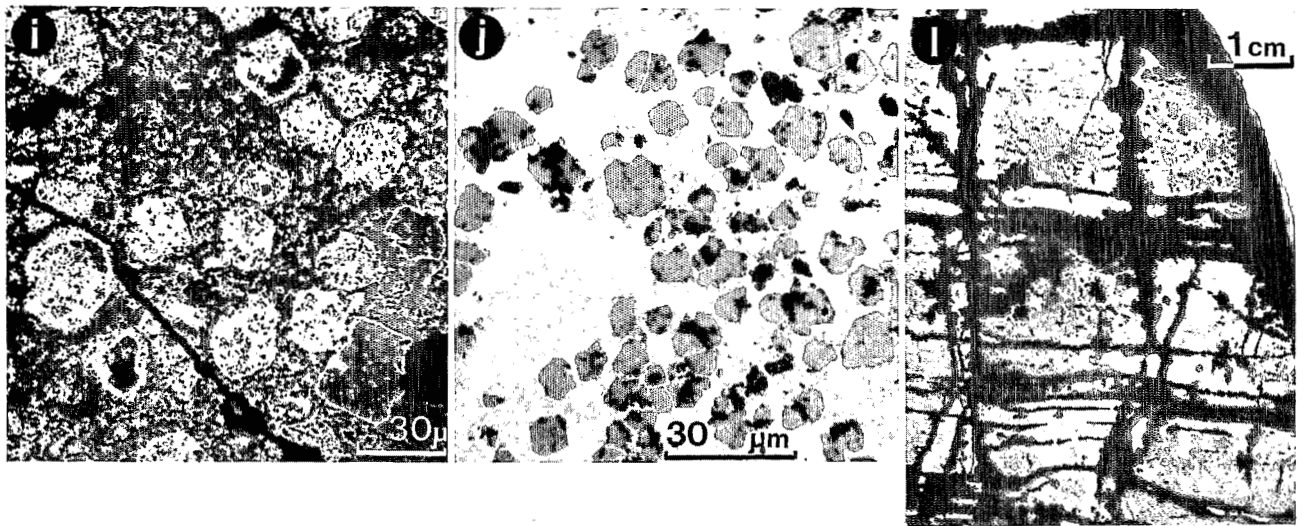


Fig. 2 a-r. Les photographies ont été faites au microscope en lumière réfléchie sauf : g : lumière transmise; l et r : macrophotographies; p : MEB. a EE 1 (Borumba). Grenats dans une gangue de quartz. Début d'altération centrifuge avec opacification du coeur de certains grenats. b EE 15 (Borumba). Altération centrifuge des grenats. Coeurs transformés en produits isotropes silico-alumineux. Couronnes résiduelles de grenat souvent interrompues. Gangue de quartz en faible proportion (visible à droite). c SS 26 (Mokta). Altération centripète des grenats. Liserés silico-alumineux périphériques avec des digitations vers le centre des grenats. Gangue de quartz. d EE 25 (Borumba). Couronnes de grenat non altérées (gris). Gangue de quartz (gris sombre). Coeur des grenats transformé en lithiophorite. La cryptomélane apparaît localement, interstitielle. e HV 44 (Tambao). Grenats altérés en périphérie avec formation de lithiophorite. La gangue de quartz est par ailleurs épigénisée par la cryptomélane. f EE 25 (Borumba). Veinule de lithiophorite avec cryptomélane concrétionnée dans un minerai à grenats. g SS 25 (Mokta). Couronne de grenat. Vide central correspondant au lessivage des produits d'hydrolyse du coeur du grenat. h SS 26 (Mokta). Anciens grenats partiellement occupés par la lithiophorite et un peu de cryptomélane. Gangue de quartz. i SS 26 (Mokta). Remplissage de cavités de lessivage par la lithiophorite et la cryptomélane. j EE 15 (Borumba). Grenats dans une matrice de cryptomélane qui a épigénisé complètement la gangue de quartz. k HV 44 (Tambao). Grenats sains englobés par la cryptomélane, à contours nets. La gangue de quartz subsiste en îlots résiduels à contours diffus, que la cryptomélane épigénise en fines arborescences (en bas à gauche). l EE 25 (Borumba). Face sciée. La transformation du minerai (épigénie de la gangue de quartz et altération des grenats en oxydes) s'est manifestée selon la foliation et le long de fractures transverses. Des veinules d'oxydes (dont une est bien visible dans la fracture verticale de gauche) et un encroûtement à la périphérie de l'échantillon (en haut à droite) soulignent l'apport de manganèse. m EE 1 (Borumba).



ba). Transformation de la périphérie des grenats en cryptomélane. L'épigénie concerne dans ce cas des liserés de produits d'hydrolyse silico-alumineux. n SS 68 (Mokta). L'épigénie par la cryptomélane concerne la gangue de quartz et les grenats eux-mêmes dont la corrosion laisse des résidus dentelés. p SS 66 (Mokta). Cryptomélane en aiguilles dans une cavité de lessivage d'un grenat. q EE 25 (Borumba). Superposition de plusieurs processus: altération centrifuge avec hydrolyse du coeur des grenats puis formation de lithiophorite et cryptomélane; épigénie partielle de la gangue quartzeuse par la cryptomélane selon la stratification. r SS 65 (Mokta). Face sciée. Après une transformation des grenats en oxydes au voisinage des plans de foliation et de fractures transverses, une phase de lessivage a détruit la majeure partie des grenats des plages qui n'avaient pas été transformées. Celles-ci (en gris clair) et en particulier leurs zones périphériques (blanches) sont des «éponges quartzéuses» sans manganèse

Note: La préparation des planches et les clichés de faces sciées ont été réalisés par Madame Monique Berger, photographe au C.G.G.M.

grenat, se concentre par rapport à l'alumine. En bordure de cette couronne le grenat apparemment non altéré présente une composition anormale avec une augmentation de la teneur en silice et une diminution de la teneur en manganèse.

Cette altération existe aussi à Mokta sur des grenats de plus grande taille mais dans des échantillons qui ont subi ultérieurement d'autres transformations (fig. 2c).

Néoformation de lithiophorite à partir de grenats hydrolysés

Dans les grenats altérés en produits isotropes silico-alumineux l'apport de manganèse en solution se traduit par la formation de lithiophorite. Lorsque l'hydrolyse était peu avancée, une couronne de grenat sain subsiste autour d'un cœur de lithiophorite associée à des quantités variables de cryptomélane (fig. 2d). Si l'apport de manganèse concerne des grenats altérés à leur périphérie, la lithiophorite apparaît en couronne, le contour initial du grenat étant conservé et la transformation peut progresser jusqu'au centre du grenat (fig. 2e). L'aluminium des produits d'hydrolyse reste ainsi sur place tandis que la silice est éliminée, la transformation étant progressive avec des matériaux intermédiaires (pour la réflectance et la composition chimique). Lorsque l'hydrolyse était complète, la lithiophorite peut apparaître en mouchetures dispersées dans les produits silico-alumineux. Elle gagne l'ensemble du grenat, un mince liseré de ces produits subsistant quelquefois à la périphérie.

Enfin des veinules et concrétions apparaissent dans certains échantillons (EE 1, EE 10), la lithiophorite largement cristallisée étant accompagnée de cryptomélane et de pyrolusite (fig. 2f).

Les minerais à lithiophorite ainsi obtenus ne renferment d'éléments de transition qu'en traces (tableau 4).

Lessivage

L'altération centrifuge des grenats en produits amorphes silico-alumineux peut être associée à un lessivage de ces produits (ou suivie d'un lessivage). Dans la partie centrale de l'ancien grenat, les teneurs d'alumine et de silice sont alors plus faibles qu'en périphérie, le rapport $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ ayant tendance à diminuer. Dans un stade plus avancé le cœur de l'ancien grenat est creux et il ne subsiste qu'une couronne de produits amorphes ou de grenat non altéré (Fig. 2g). Celle-ci est réduite à une mince auréole, ou disparaît complètement dans les plages les plus lessivées, ne laissant que la gangue quartzreuse piquetée de cavités polyédriques dont les contours eux-mêmes peuvent perdre de leur netteté. On obtient ainsi des minerais très pauvres (quelques % de MnO) à forte porosité (SS25, EE29 a).

La disparition de grenats avec la formation de cavités résulte plus rarement du phénomène d'altération centripète avec le lessivage progressif des liserés silico-alumineux au fur et à mesure de leur développement vers le cœur du grenat (éch. SS26).

Le lessivage se manifeste aussi sur des échantillons où l'hydrolyse a été suivie de la néoformation de lithiophorite. On observe alors des cavités irrégulièrement frangées de ce minéral. Le doute subsiste parfois pour l'interprétation de cette configuration qui pourrait pro-

Tableau 4. Composition chimique des lithiophorites

	a	b	c	d	e	f
MnO ₂	57,04	57,63	58,23	62,10	61,49	60,27
Fe ₂ O ₃	0,14	0,09	0,29	—	—	—
SiO ₂	0,54	0,18	0,10	0,18	0,20	0,30
Al ₂ O ₃	23,85	23,87	24,12	19,10	19,40	20,40
Na ₂ O	0,03	—	—	0,10	0,05	0,10
K ₂ O	0,08	—	—	0,83	0,60	0,50
CaO	0,06	—	—	0,02	—	—
MgO	—	—	0,01	0,02	—	—
TiO ₂						
Cr ₂ O ₃						
NiO		0,11			0,30	0,03
CuO			0,09	2,98	2,80	3,10
CoO	0,17				0,05	
ZnO	0,05		0,03	0,59	0,80	1,02
PbO						

a, b, c, = EE 10, lithiophorite néoformée à partir de grenats hydrolysés

d, e, f, = SS26, lithiophorite néoformée dans les cavités formées par le lessivage des grenats

venir d'une néoformation tardive, après le lessivage de la majeure partie des produits d'hydrolyse (fig. 2h).

Néoformation de lithiophorite dans les cavités formées par le lessivage des grenats (tableau 4)

Lorsque les grenats ont subi un lessivage intense on aboutit à un faciès alvéolaire du minerai où subsistent encore quelques fins liserés silico-alumineux. Si ce faciès subit un apport en manganèse, on observe alors la formation graduelle de la cryptomélane et de la lithiophorite en îlots à l'intérieur des vides d'anciens grenats (fig. 2i).

La lithiophorite issue de ce processus renferme toujours d'importantes teneurs en éléments de transition (Cu, Ni, Co, Zn). Elle joue, en milieu continental, un rôle voisin de celui de la todorokite dans les nodules polymétalliques des océans. Cet aspect sera développé dans une publication ultérieure.

L'épigénie par la cryptomélane

Cette transformation a été décrite à différentes échelles dans les gisements. Elle concerne à Mokta des filons pluridécimétriques de quartz dont les oxydes concrétionnés de manganèse ne laissent subsister que des résidus ovoïdes de quelques centimètres de dimension principale. Elle concerne aussi, dans les sols, les argiles kaoliniques ou la matière organique d'anciennes racines (Grandin et Perseil 1977). Ici c'est dans les premiers stades de l'altération des quartzites à grenat qu'elle est fréquemment observée.

L'épigénie du quartz

L'épigénie du quartz par la cryptomélane peut précéder toute autre transformation. On observe alors des grenats sains dans une matrice de cryptomélane (tableau 5). L'épigénie peut concerner de larges plages d'un échantillon,

Tableau 5. Composition chimique de la cryptomélane qui épigénise le quartz (a, b, c) et les grenats (d, e, f; EE 15).

	a	b	c	d	e	f
MnO ₂	89,62	90,03	92,03	90,08	90,05	93,67
Fe ₂ O ₃	0,15	0,10	0,09	0,33	0,36	0,14
CaO	0,59	0,60	0,47	0,38	0,50	0,29
SiO ₂	0,05	0,05	0,09	2,39	0,21	0,41
TiO ₂	—	—	—	0,08	—	0,08
MgO	0,02	0,01	0,08	0,03	0,03	0,14
Cr ₂ O ₃	—	—	—	—	—	—
NiO	0,15	0,18	0,18	—	—	—
K ₂ O	2,49	2,50	1,66	1,48	3,06	0,46
Na ₂ O	0,06	0,04	0,06	0,09	0,31	0,07
Al ₂ O ₃	0,63	0,60	0,74	2,92	1,74	1,08

limitées par des fronts arqués ou bothryoïdaux qui restent nets à l'échelle microscopique, une structure concrétionnée de la cryptomélane tendant à se superposer à la texture grenue fine de la roche initiale (EE 15). Elle peut mener à des minerais à cryptomélane massive dans laquelle subsistent des grenats résiduels (fig. 2j, k).

Plus souvent l'épigénie s'est produite à partir de lignes de moindre résistance (fractures, stratification), les solutions manganésifères ayant progressé plus ou moins loin en donnant aux zones épigénisées, dans le détail, des limites digitées ou diffuses (fig. 2l).

La périphérie du grenat subit souvent une légère transformation. D'une part, le contour polygonal perd de sa netteté géométrique, devenant dentelé par une progression limitée de la cryptomélane aux dépens du grenat. D'autre part, un liseré périphérique de composition anormale et qui peut ne pas être optiquement distinct apparaît au contact grenat-cryptomélane. Les essais d'analyse à la microsonde sont peu fiables, l'étroitesse de ces liserés (un à quelques microns) ne permettant pas d'éviter des interférences avec les matériaux voisins. On note ainsi des teneurs fortes en manganèse et potassium, pouvant être liées à des contacts obliques de cryptomélane, à côté de compositions proches de celle du grenat, déprimées en silice et en alumine et faisant place au potassium.

Quoiqu'il en soit, le phénomène d'épigénie, dans ce cas, concerne assez spécifiquement le quartz. Il permet de maintenir des grenats inaltérés, y compris lorsque des phases ultérieures d'hydrolyse et de lessivage, détruisent les grenats restés dans leur gangue quartzeuse initiale.

L'épigénie des grenats

Les grenats comportent une couronne d'oxydes, d'épaisseur variable. Les plus petits ne montrent plus que des îlots résiduels de grenat dans la cryptomélane. L'épigénie peut être complète et donner des polyèdres opaques dans la gangue quartzeuse.

Dans EE 1, à proximité de fractures, des grenats à liserés périphériques minces de cryptomélane voisinent avec des grenats présentant l'altération centripète précédemment décrite. Dans ce cas, la cryptomélane n'épigéniserait pas directement le grenat mais remplacerait des liserés périphériques de produits d'hydrolyse (fig. 2m).

Le plus souvent l'épigénie du grenat vient en prolongation de celle du quartz (HV 44, SS 68). Les grenats

englobés dans la cryptomélane sont corrodés à leur tour par celle-ci, et ne subsistent qu'à l'état d'îlots résiduels, leur contour initial s'effaçant totalement (fig. 2n).

L'envahissement par la cryptomélane

Lorsque la fracturation et les lessivages ont créé des vides, ceux-ci peuvent être envahis par des oxydes de manganèse, lors d'étapes ultérieures de transformation des minerais. La cryptomélane peut ainsi pénétrer les grenats en cours d'altération, dès le stade de l'hydrolyse accompagnée de néoformation de lithiophorite, elle frange les cavités de lessivage bordées de couronnes de grenat résiduel ou de produits d'hydrolyse silico-alumineux, elle remplit partiellement, éventuellement accompagnée de lithiophorite, les vides polyédriques laissés par la dissolution totale des grenats (fig. 2p). Des apports de fer accompagnent dans certains cas les apports de manganèse.

Les combinaisons et les résultats des divers modes d'altération

Hydrolyse et lessivage mènent parfois à des minerais ayant perdu la majeure partie du manganèse contenu dans le protore et ayant acquis une forte porosité (plus de 20% du volume total pour l'échantillon EE 29 b). L'altération est dans ce cas un appauvrissement du minerai en place. Mais la mise en solution de manganèse dans un milieu bien drainé, peut donner l'occasion d'accumulations en aval (verticalement ou latéralement). Parmi celles-ci l'une des plus importantes est l'épigénie du quartz par la cryptomélane, voie d'enrichissement absolu du minerai, qui s'accompagne d'une élimination massive de silice. Elle a lieu généralement en profondeur, à un stade initial où les grenats ne sont pas encore altérés ou le sont peu. Bien que souvent incomplète, elle est une protection ultérieure contre l'hydrolyse ou le lessivage brutal, la perméabilité des ciments de cryptomélane massive étant beaucoup plus faible que celle des gangues de quartz.

La néoformation de lithiophorite et l'envahissement par la cryptomélane des cavités des grenats altérés interviennent postérieurement. La silice des produits d'altération des grenats est évacuée ainsi qu'une part de l'alumine. Mais l'enrichissement passe dans ce cas par un détour: éliminé d'abord lors de l'hydrolyse et du lessivage, le manganèse est importé ensuite pour se fixer là où les produits amorphes silico-alumineux se sont formés. Dans un ancien grenat, la quantité de manganèse sous forme d'oxydes est très souvent supérieure à la quantité initiale. Si le remplacement des grenats par des oxydes est assez général, il y a là une voie d'enrichissement des minerais.

Les minéralisations vont finalement se distinguer, d'une part par la séquence des transformations subies, d'autre part, par les volumes concernés par chaque étape de transformation. L'épigénie du quartz et le remplacement des grenats par la cryptomélane procèdent souvent le long de fractures ou de plans de stratification (fig. 2q). L'hydrolyse des grenats et le lessivage des produits isotropes silico-alumineux au contraire, concernent volontiers des volumes continus. Si les transformations citées en premier ont eu lieu dans une partie de ces volumes, on obtient des échantillons qui présentent en section des plages quadrangulaires gris clair lessivées dans un réseau

maillé d'oxydes noirs, l'importance relative des unes et des autres déterminant la richesse du minerai (fig. 2r). La mise en place de la lithiophorite procède souvent par plages à contour diffus, donnant des minerais tachetés comme ceux du sommet des collines de Borumba.

Des dominances peuvent être mises en relation avec les étapes d'évolution des gîtes (milieu d'altération lié au climat et au site topographique qui varie avec l'évolution du modèle). Les larges épigénies initiales seraient surtout le fait de l'évolution profonde des lentilles avant la dissection des aplanissements cuirassés de la fin du Tertiaire (Grandin 1976). Les hydrolyses de plages à grenats dans des réseaux d'oxydes seraient contemporains de la formation des croupes sur les versants desquelles se sont mises en place les cuirasses manganésifères (et l'échantillon maillé SS 65 provient bien de l'amont d'une telle cuirasse). Les lessivages ne laissant que des cavités polygonales dans la matrice de quartz seraient liés aux incisions régressives accélérant le drainage (et c'est bien en tête d'une telle incision profonde, atteignant les minéralisations de la partie centrale du gisement de Mokta, qu'a été prélevé l'échantillon SS 25 lessivé).

Ainsi s'intègrent dans une longue histoire les différents types de lessivage et de piégeage du manganèse des grenats, liés à la mobilité de celui-ci dans les milieux acides de quartzites et de schistes séréciteux birrimiens, jusqu'à ce que soit atteinte la forme stable du cryptomélane rassemblé en masses compactes dans les altérites ferrallitiques où le quartz s'élimine. Ces phénomènes ne ressortent pas d'une évolution en régime permanent de différents horizons d'un profil d'altération unique, soumis aux seules actions géochimiques. Leur superposition dans les profils, leur succession dans le temps pour un volume donné de roches, sont régies par une modification discontinue de la surface topographique au point considéré et par une transformation du relief d'ensemble du gisement qui commande la qualité du drainage et qui fait place à des périodes d'incision ou d'ablation. Celles-ci font disparaître ou remanient une partie des minerais antérieurement formés. Conservés en éluvions superficielles, de tels minerais peuvent être les derniers mais fidèles témoins d'étapes anciennes d'évolution qui se révèlent communes aux différents gîtes d'Afrique de l'ouest (Grandin 1976, Perseil et Grandin 1978). Situés sur des collines dominant un système de glaciaires quaternaire ancien, associés à des altérations kaoliniques profondes, les minerais oxydés exploitables apparaissent résiduels et les transformations décrites sont en grande part inactuelles, voire antérieures au Quaternaire.

Il est à noter que des modalités différentes d'altération des grenats existent pour des grenats ferrugineux et sont présentées par d'autres auteurs pour les grenats manganésifères, mettant en valeur l'oxydation directe qui n'est pas observée dans les grenats des gîtes de manganèse étudiés ici.

Dans le gîte de Ziemougoula (Côte d'Ivoire) l'altération des spessartites fait une place importante à la birnessite (Nzeingui-Mapangou, 1981). Celle-ci et la lithiophorite sont décrites comme des minéraux de transformation sur place des grenats. Elles apparaîtraient dans des horizons distincts d'un même profil d'altération fonctionnel, la première à la base, initiale, la seconde postérieure, plus proche de la surface topographique (Beauvais et Nahon, 1983).

Des grenats ferrugineux, même associés à des grenats manganésifères, présentent des processus d'altération bien distincts, comme à Mokta, où la goethite apparaît le long des fractures, en bordure de plages de grenat sain. Dans la province de Carajas (Brésil), Parisot, Delvigne et Croke (1983) décrivent l'altération de grenat almandin avec la formation d'oxy-hydroxydes de fer bien cristallisés en périphérie et le long de fractures, suivie de celle d'oxyhydroxydes moins bien cristallisés progressant de façon centripète aux dépens du grenat.

Conclusion

L'étude des protores à gangue siliceuse met en évidence la fréquence, pour les grenats spessartites, d'une altération initiale en produits isotropes silico-alumineux avec perte de la quasi-totalité du manganèse, ainsi que du fer et du calcium. Cette hydrolyse est accompagnée d'un lessivage qui peut aller jusqu'à l'élimination complète de tous les constituants du grenat initial, donnant localement une éponge quartzreuse, comme on en rencontre dans l'altération de gîtes sulfurés en milieu siliceux (Sornein 1980, Pagis 1983). Général et donc important, ce type d'altération peut être discret dans un gisement. En effet l'enrichissement des gisements est obtenu lorsque ces phénomènes d'hydrolyse et de lessivage sont relayés, à un stade plus ou moins avancé, parfois au fur et à mesure de la formation de franges hydrolysées, par des néoformations d'oxydes de manganèse. Celles-ci impliquent un transit, limité ou non, de manganèse en solution, l'importation de manganèse étant patente à l'échelle du grenat (du moins de l'espace qu'occupait le grenat) comme à l'échelle du corps minéralisé exploitable pour lequel la teneur du protores a été multipliée par un facteur de l'ordre de 3. On obtient de la lithiophorite et de la cryptomélane accompagnée éventuellement de nsutite.

Mais la cryptomélane peut aussi épigéniser les minéraux primaires et en particulier la gangue de quartz. Un enrichissement absolu avec élimination de silice prend ainsi place, d'autant plus remarquable qu'il peut précéder toute hydrolyse du grenat. Quelle que soit l'importance des remaniements associés ou ultérieurs (formation de cuirasses à haute teneur par piégeage dans des sols de manganèse transporté vers les bas de pente, appauvrissement par ablation) les phénomènes décrits sont à la base de l'existence de gisements exploitables, obtenus à partir de quartzites à grenat spessartite, dont Mokta est un bon exemple.

Il reste à souligner que l'actualité (ou du moins la continuité dans le temps jusqu'à l'actuel) des transformations observées n'est nullement garantie. L'étude microscopique des paragenèses supergènes met en évidence la succession des processus d'altération mais ne renseigne pas sur les intervalles de temps qui séparent leurs interventions respectives et séparent celles-ci de l'actuel. Elle doit être intégrée aux observations faites à l'échelle des corps minéralisés et des formes de relief pour éclairer la genèse des gisements.

Bibliographie

Arnould, M.: Le manganèse dans le NW de la Côte d'Ivoire. Les gisements de Dassoumbé et Lagnokaha. Dir. Fed. Mines Géol., Dakar, Rapport multigr., 25 p. (1954)

- Bagarre, E.: Géologie du gisement de manganèse de Ziemougoula et de la région environnante. SODEMI, Abidjan, Rapport multigr., 31 p. (1963)
- Beauvais, A. et Nahon, D.: Chemical weathering of garnets under lateritic conditions. Example of Ziemougoula (NW of Ivory Coast). Coll. Intern. Pétrologie des altérations et des sols. C.N.R.S., Paris, Abstracts, p. 102 (1983)
- Cance, E., Croella, E., Carrigues, G., et Tabouret, M.: Le gisement de manganèse de Grand-Lahou (Côte d'Ivoire). Rapport SEGM, Ecole des Mines de Paris, multigr., 19 p. (1958)
- Delfour, J.: Géologie du gîte de manganèse de Tambao (Haute-Volta). Rapport BRGM 5 612, multigr., 20 p. (1963)
- Grandin, G.: Aplissements cuirassés et enrichissement des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Mém. Orstom 82:275 (1976)
- Grandin, G. et Perseil, E.A.: Le gisement de manganèse de Mokta (Côte d'Ivoire). Transformations minéralogiques des minerais par action météorique. Bull. Soc. Géol. France, (7), t. XIX, n° 2:309-317 (1977)
- Lelong, F., Tardy, Y., Grandin, G., Trescases, J.J. et Boulange, B.: Pedogenesis chemical weathering and processes of formation of some supergene ore deposits. In Handbook of strata-bound and stratiform ore deposits. Ed. by Wolf K.H., vol. 3:93-173 (1976)
- Nziengui-Mapangou: Pétrologie comparée de deux gîtes supergènes mangésifères: Ziemougoula (Côte d'Ivoire), Moanda (Gabon). Thèse 3e cycle. Univ. de Poitiers, 103 p. (1981)
- Pagis, G.: Altération supergène du gisement aurifère de Salsigne (Aude, France). Thèse Doc.-Ing. Ecole des Mines de Paris, 171 p. (1983)
- Parisot, J.C., Delvigne, J. et Croke, M.T.C.: Petrographical aspects of the supergene weathering of garnet in the Serra dos Carajás (Para, Brazil) Coll. Intern. pétrologie des altérations et des sols, C.N.R.S., Paris, Abstracts, p. 47 (1983)
- Perseil, E.A. et Grandin G.: Evolution minéralogique du manganèse dans trois gisements d'Afrique de l'Ouest: Mokta, Tambao, nsuta. *Mineral. Deposita* 13:295-311 (1978)
- Servant, J.: Les gisements et indices de manganèse de l'Afrique occidentale française. XXe Congr. géol. intern. Mexico, Symp. Yacim. Mangan., 2:89-114 (1956)
- Sorem, R.K. et Cameron, E.N.: Manganese oxides and associated minerals of the Nsuta manganese deposits, Ghana, West Africa. *Econ. Geol.*, 55:278-310 (1960)
- Sornein, J.F.: Altération supergène de minéralisations ferrifères. Les chapeaux de fer du gisement de sidérite de Batère (Pyrénées Orientales) et du gisement de pyrite de Sain-Bel (Rhône). Tèse Doc.-Ing. Ecole des Mines de Paris, 150 p. (1980)
- Soule de Lafont, D.: Le Précambrien moyen et supérieur de Bondoukou (Côte d'Ivoire) Thèse Sci. Paris et Bull. Dir. Féd. Mines Géol., Dakar, 18:174 (1956)
- Zanone, L.: Le manganèse des complexes volcano-sédimentaires précambriens en Côte d'Ivoire. *Chron. des Mines et de la Rech. minière*, 371:71-85 (1968)

Received: January 25, 1984

Accepted: February 20, 1985

Book review

Mineral resources appraisal. Mineral endowment, resources and potential supply: concepts, methods and cases. — De Verle P. Harris, Oxford Geological Sciences Series, Oxford University Press, New York 1984, 59,00 US-\$, 445 pages, ISBN 0-19-854456-1

The new field of mineral resources appraisal is an interdisciplinary approach to the assessment of mineral and energy resources by combining aspects of economic geology, geostatistics and operations research. D. P. Harris has compiled all available models and concepts in a textbook containing the theoretical (mathematical) background of the models as well as various case studies. Based on a resource appraisal by means of economic activity models (Hubbert, Liebermann), the book provides a comprehensive summary of quantity-quality models for predicting mineral quantities of lower grades or grades associated with

larger quantities of geostatistical mineral-deposit models, of spatial and multivariate occurrence models and of resource analyses for mineral occurrence and discovery. The very interesting case studies for resource analyses refer to mineral endowment and potential supply in British Columbia and the Yukon Territory, Canada, to the estimation of copper endowment in northern Sonora, Mexico, to the estimation of uranium resources in New Mexico, USA, and to the oil resource appraisal by the U.S. Geological Survey. In one of the final chapters the author discusses the psychological issues and motivations in the assessment of subjective probability because an appraisal of mineral endowment is naturally based upon the opinions of experts.

This excellent book will be of interest to mineral economists as well as to geologists and systems analysts. W. Gocht