

Evolution minéralogique du manganèse dans trois gisements d'Afrique de l'Ouest: Mokta, Tambao, Nsuta

E. A. Perseil

Laboratoire de Minéralogie. Muséum d'Histoire Naturelle, Paris

G. Grandin

Mission ORSTOM, La Mariscalá, San Isidro, Lima, Pérou

The paragenesis resulting from supergene enrichment of three precambrian, west african, manganese deposits differ according to the nature of primary minerals. They do not differ with respect to present geographical and climatic environment in spite of their great diversity.

The transformation of protorees of the interstratified lenses commences with the appearance of transitory minerals: lithiophorite issued from garnets, manganite or birnesite issued from carbonates and often relayed by pyrolusite. Followed by stable oxides: cryptomelane, nsutite, ramsdelite. This last one is a major component of durricrust ores (formed by secondary precipitation of manganese in soils). It represents the final stage of supergene evolution. In interstratified lenses, as well as in durricrusts, pyrolusite appears instable.

Les paragenèses résultant de l'enrichissement supergène de trois gisements manganésifères ouest-africains, d'origine précambrienne, diffèrent selon la nature des minéraux primaires. Elles ne diffèrent pas selon le contexte géographique et climatique actuel bien qu'il soit très varié.

Cela confirme un enrichissement relativement ancien au cours d'une période humide concernant toute l'Afrique de l'Ouest.

La transformation des protorees des lentilles interstratifiées débute par l'apparition de minéraux transitoires: lithiophorite issue des grenats, manganite ou birnesite issues des carbonates et souvent relayées par la pyrolusite. Viennent ensuite des oxydes stables: cryptomélane, nsutite, ramsdellite. Cette dernière, bien représentée dans les minerais de cuirasses (formés par dépôt secondaire de manganèse dans certains sols), correspond au terme de l'évolution supergène. Aussi bien dans les lentilles que dans les cuirasses, la pyrolusite apparait instable.

Fonds Documentaire ORSTOM

Cote: B* 9154 Ex: 1

0026-4598/78/0013/0295/\$03.40

Fonds Documentaire ORSTOM



010009154

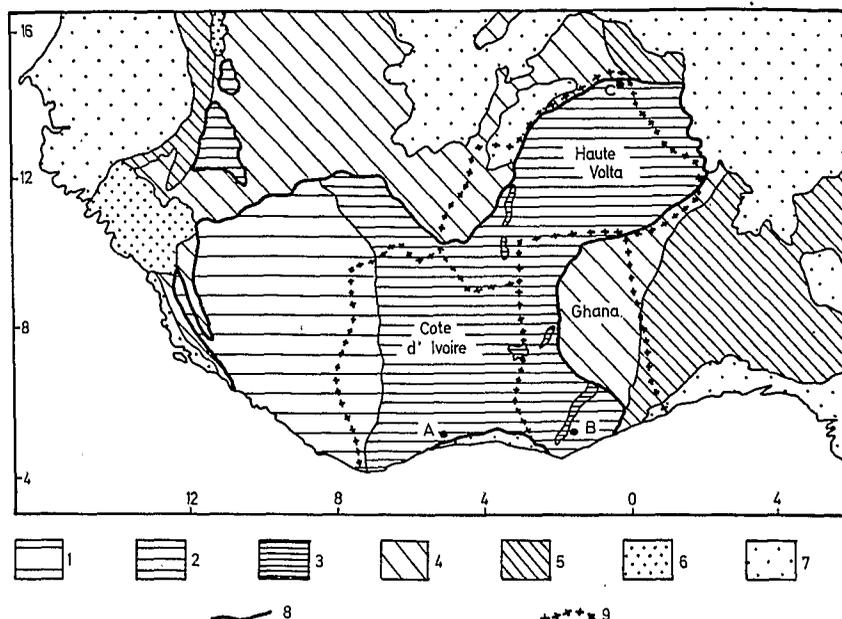


Fig. 1. Situation, Contexte Géologique (d'après Black, 1967)

1: Précambrien inférieur ou indifférencié. 2: Birrimien (Précambrien moyen volcano-sédimentaire ou flyschoidé). 3: Tarkwaïen (Précambrien moyen mollassique). 4: Précambrien supérieur et Cambrien, couverture de plate-forme. 5: Précambrien supérieur et Cambrien, zones mobiles tectonisées. 6: Paléozoïque. 7: Mésozoïque et Cénozoïque. 8: Limite du socle précambrien cratonisé. 9: Frontières de la Côte d'Ivoire, du Ghana et de la Haute-Volta
Gisements de manganèse: A: Mokta. B: Nsuta. C: Tambao

Par l'analyse minéralogique des protores et des minerais superficiels, en tenant compte de l'évolution du relief et du climat cette étude tente de cerner les mécanismes d'accumulation du manganèse dans les concentrations exploitables de trois gisements ayant une même origine précambrienne: Mokta et Nsuta dans la zone forestière actuelle d'Afrique de l'Ouest; Tambao, dans la zone sahélienne.

Si l'on doit tenir Mokta et Tambao comme de petits gisements à l'échelle mondiale, il n'en est pas de même de Nsuta qui fut longtemps le plus gros producteur du monde et le principal fournisseur de minerai de piles.

I. CADRE GÉOLOGIQUE ET GEOMORPHOLOGIQUE

Les trois gisements étudiés appartiennent au socle ouest-africain, marqué

par l'orogénèse éburnéenne qui débute vers 2.000 millions B. P. (Bonhomme, 1962; Black, 1967; Rocci, 1965; Roques, 1948) (Fig. 1).

Le socle éburnéen est constitué de sillons birrimiens volcano-sédimentaires, alternant avec des panneaux de granites hétérogènes orientés, allongés selon la direction NNE-SSO. Des granites circonscrits homogènes recoupent l'ensemble.

Dans les sillons birrimiens, des horizons manganésifères se suivent sur de grandes distances (jusqu'à plus de 100 km), associés à des schistes sériciteux fins, d'origine cinéritique probable et à des quartzites jaspoides. Le long de ces horizons la minéralisation est discontinue et se dispose en faisceaux de lentilles, bien individualisées dans un contexte stérile. Les lentilles sont généralement de dimension modeste (un à quelques mètres d'épaisseur, quelques dizaines à

quelques centaines de mètres d'allongement). Elles apparaissent le plus souvent fortement redressées à sub-verticales.

Faible à Mokta (micaschistes supérieurs), et à Nsuta, le métamorphisme est plus marqué à Tambao où apparaissent des gneiss fins et des amphibolites. A Nsuta et à Tambao, des intrusions granitiques interrompent localement la minéralisation en profondeur.

Les principaux minéraux des protores sont la rhodochrosite, la spessartite et la braunite, parfois la hausmannite, plus rarement la rhodonite ou la téphroïte. La rhodochrosite domine à Tambao et Nsuta; la spessartite à Mokta.

Les trois gisements sont situés sur des collines dominant un bas-pays ondulé ou aplani, où s'observe la marque de systèmes de glacis quaternaires (haut-glacis, moyen-glacis, bas-glacis; Vogt, 1959; Michel, 1973). Cette marque est très estompée dans la région de Nsuta, elle est plus nette dans la région de Mokta, elle est omniprésente dans la région sahélienne de Tambao où le bas-glacis est encore fonctionnel.

Les collines des gisements diffèrent tant par leurs altitudes absolues que par leurs formes (Fig. 2, 3, 4):

- chaîne continue à large zone sommitale légèrement convexe, culminant à 140 m pour Mokta.
- chapelet de collines à pentes fortes et sommets arrondis culminant à 180 m pour Nsuta.
- longue colline à crête étroite et à flancs raides culminant à 350 m pour Tambao.

Mais elles ont en commun, malgré les grandes distances qui les séparent, avec un écart en latitude de plus de 9°, trois caractéristiques importantes (Grandin, 1976):

- leur altitude relative est de l'ordre de 100 m.
- dans leurs matériaux superficiels sommitaux et en éboulis sur leurs flancs, on observe de nombreux blocs et gravillons de cuirasse ferrugineuse dont les compositions chimiques et mi-

néralogiques ainsi que les faciès sont caractéristiques des cuirasses "intermédiaires".

Sont désignées comme intermédiaires, des cuirasses ferrugineuses d'une même génération, rencontrées en Afrique de l'Ouest de la côte atlantique à la boucle du Niger (Gavaud, 1966; Boulet, 1970; Eschenbrenner et Grandin, 1970). Elles se sont formées vers la fin du Tertiaire, sur un vaste système de glacis qui occupait les bas-pays de l'époque, et qui est souvent nommé "surface intermédiaire". Elles sont associées à d'épaisses lithomarges kaoliniques.

- des témoins conservés de la surface cuirassée intermédiaire apparaissent à quelques kilomètres de chacun des trois gisements: plateaux de Dahiri culminant à 170 m à 6 km de Mokta, butte tabulaire de Tatalakat d'altitude 350 m à 7 km de Tambao, plateaux de Kube-kuro culminant à 190 m à 3 km de Nsuta.

Les collines des trois gisements proviennent donc de la dissection d'une ancienne surface d'aplanissement, avec inversion de relief. A l'origine ce sont des butte-témoins cuirassées, individualisées avant la formation du haut-glacis quaternaire ancien. Jusqu'à ce stade l'évolution supergène des gisements s'effectue dans des conditions morphoclimatiques comparables. Elle se diversifie par la suite, tandis que s'affirme la zonalité climatique actuelle, ce qui rend compte de la variété des formes de ces collines.

II. LES PROTORES ET LEUR OXYDATION

A. Quartzite à grenat

1. Gisement de Mokta

Le minerai exploitable de Mokta provient principalement de l'enrichissement progressif en oxydes de quartzites à grenats (Tableau 1). Si des sondages ont mis en évidence la rhodochrosite et la braunite, celles-ci ne forment une partie appréciable du minerai primaire que dans deux lentilles.

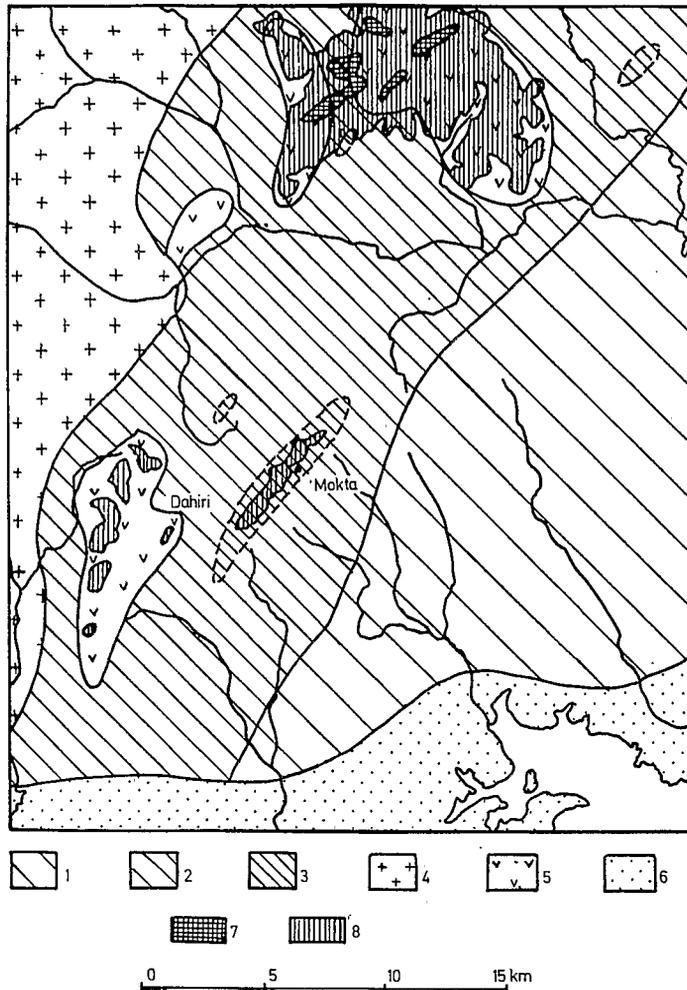


Fig. 2. Mokta. 1: Birrimien flyschöide. 2: Birrimien volcano-sédimentaire. 3: Zones manganésifères. 4: Granites éburnéens. 5: Roches volcaniques basiques. 6: Continental Terminal cénozoïque. 7: Altitude supérieure à 260 m. 8: Altitude entre 120 et 260 m

La première étape d'évolution des grenats correspond à une hydrolyse souvent accompagnée de lessivage. Une partie du manganèse mobilisé est recombinaisonnée avec les résidus d'hydrolyse (dont l'alumine) sous forme de lithiophorite. Le remplacement du grenat par la lithiophorite a lieu soit du centre vers la périphérie (ce qui correspondrait à du manganèse autochtone recombinaisonné rapidement), soit de la périphérie vers le centre (ce qui correspondrait à du manganèse al-

lochtone issu des parties proches du banc minéralisé et compensant des pertes par lessivage). Au cours de ces transformations les contours initiaux des grenats sont toujours conservés.

La deuxième étape d'évolution est marquée par l'apparition de la cryptomélane. En général celle-ci remplace d'abord la gangue siliceuse des grenats. Elle occupe ensuite les plages hexagonales des grenats altérés, le remplace-

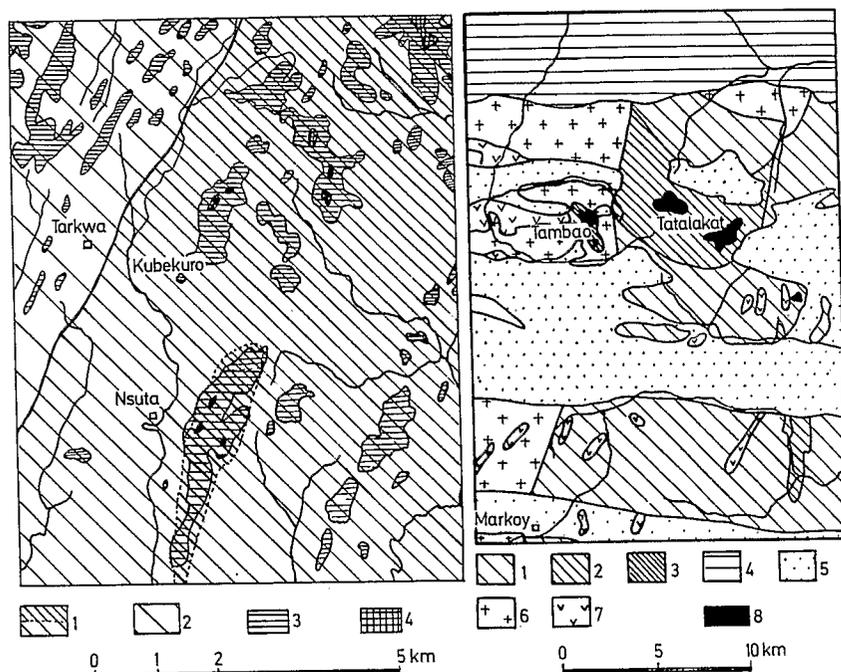


Fig. 3. Nsuta. 1: Birrimien volcano-sédimentaire. Hachures fines: zone manganésifère. 2: Tarkwaien gréseux et conglomératique. 3: Altitudes comprises entre 105 et 165 m. 4: Altitudes supérieures à 165 m

Fig. 4. Tambaos. 1: Conglomérats, arkoses, schistes tarkwaiens. 2: Schistes sériciteux et tuffacés birrimiens. 3: Zone manganésifère. 4: Couverture infra-cambrienne. 5: Cordons dunaires quaternaires. 6: Granites. 7: Roches volcaniques basiques, gabbros, amphibolites. 8: Altitudes supérieures à 300 m

Tableau 1. Evolution minéralogique- Gisement de Mokta - Minerai de lentille

<u>Faciès stratifié</u> à <u>enrichissement</u> <u>progressif</u>	(a) (SS65) - grenats — lithiophorite; cryptomélane - groutite — lithiophorite; cryptomélane → nsutite → ramsdellite	} Kaolinite + goethite entre les bancs d'oxydes
	(b) (SS 26, 66, 68) - grenats { lithiophorite cryptomélane - groutite → nsutite - hausmannite - braunite - nsutite → ramsdellite - pyrolusite = ramsdellite	
<u>Faciès stratifié</u> à <u>structure massive</u> <u>compacte</u>	(SS42) braunite hausmannite manganite cryptomélane + nsutite nsutite → ramsdellite	
<u>Faciès stratifié</u> à <u>oxydation intense</u>	(SS38) (SS39) manganite groutite → ramsdellite hausmannite	} Kaolinite + goethite dans la minéralisation

== = remplacement; → = évolution directe

ment se faisant toujours de la périphérie vers le centre, à la faveur de microfissures ou de tout autre défaut de structure. Lorsque cette étape est suffisamment avancée on obtient des masses de cryptomélane où les contours hexagonaux des anciens grenats s'estompent. On observe aussi l'apparition de plages de nsutite au sein des masses de cryptomélane (Grandin et Perseil, 1977).

2. Gisement de Tambao

Seule une très faible proportion du minerai de Tambao provient de quartzites à grenats, qui forment des bancs minces, intercalés dans des séricitoschistes et bien distincts des couches minéralisées principales carbonatées. Cette proportion pouvait être plus forte avant la mise en relief du gisement. En effet, les couches principales, puissantes, ont offert une forte résistance à la dissection quaternaire, après leur oxydation en masses compactes d'oxydes au cours de la période d'altération des aplanissements intermédiaires. Elles forment le plan axial de la grande colline du gisement. Les bancs minces de minerai à grenat n'apparaissent que sur les flancs de celle-ci. Leurs parties supérieures ont été érodées ce qui ne permet pas d'observer les stades les plus avancés d'oxydation. Certains bancs ont pu être complètement détruits, dont il faudrait rechercher les racines sous les matériaux d'épandage du bas-glacis, au pied du gisement.

La première étape d'évolution se déroule selon le même schéma qu'à Mokta, avec la néoformation de lithiophorite suivant l'hydrolyse des grenats (Tableau 3).

La seconde étape, outre le fait que l'on n'en observe que l'aube (la proportion de cryptomélane restant réduite), se manifeste de façon différente. En effet, la cryptomélane apparaît au sein des plages de lithiophorite ou bien, lorsque les grenats ne sont que partiellement transformés, en liserés bordant le noyau non hydrolysé et le séparant de la lithiophorite néoformée.

On pourrait voir là une transition rapide de la première étape à la seconde, manifestant des conditions plus oxydantes au cours de la transformation en profondeur des minerais primaires. Mais il s'agit plus vraisemblablement d'un effet de la dissection, amenant à proximité de la surface topographique des portions de bancs minéralisés où la première étape d'évolution était en cours. Celle-ci aurait été interrompue. Sur la nouvelle forme de relief, l'évolution des minerais aurait repris (et pourrait se poursuivre très lentement dans la période actuelle) avec la formation de cryptomélane dans les conditions oxydantes et acides de la partie superficielle du sol. Mais une moindre intensité du lessivage n'aurait pas permis le remplacement de la matrice siliceuse des grenats.

3. Gisement de Nsuta

Comme celui de Tambao, le protore du gisement de Nsuta est principalement carbonaté et les quartzites à grenat ne participent à la formation des minerais exploitables que dans une très faible proportion.

Les quartzites à gros grenats observés dans la partie nord de la colline A suivent le schéma d'évolution décrit antérieurement, avec l'apparition de lithiophorite dans les grenats et de cryptomélane en imprégnation dans la roche, à partir des fissures (Tableau 4). Mais la lithiophorite forme également de belles concrétions dans certaines fissures. Dans ces concrétions on observe une transformation de la lithiophorite en cryptomélane et nsutite, débutant par l'apparition de minuscules flots de cryptomélane, dispersés dans la masse de lithiophorite. Il existe également des concrétions dans les structures desquelles la lithiophorite et la cryptomélane sont étroitement associées.

Ces particularités permettent d'envisager une étape initiale où l'hydrolyse des grenats est accompagnée d'un lessivage assez intense, favorisant la migration en profondeur des produits d'hydro-

Tableau 2. Evolution minéralogique -Gisement de Mokta -Minerai de cuirasse

Minerai de formation secondaire	- cryptomélane - nsutite + goethite, groutite + kaolinite - pyrolusite = cryptomélane → nsutite lithiophorite	} Nombres débris végétaux
Minerai remanié dans les cuirasses	- grenats (SS 63) $\left\{ \begin{array}{l} \text{lithiophorite} \\ \text{cryptomélane} \rightarrow \text{nsutite lithiophorite} \end{array} \right.$ - grenats lithiophorite + goethite ramsdellite — groutite manganite → pyrolusite = ramsdellite - grenats (SS 64) $\left\{ \begin{array}{l} \text{gel de fer goethite lithiophorite groutite} \rightarrow \text{ramsdellite} \end{array} \right.$	

== = remplacement; — = évolution

Tableau 3. Evolution minéralogique - Gisement de Tambao

Echantillons	Minéralogie et paragenèse	Particularités des microstructures et des faciès
1 Minerai de cuirasse	HV 26 - associations: $\left\{ \begin{array}{l} \text{goethite - romanéchine} \\ \text{birnessite} \rightarrow \text{ramsdellite} \end{array} \right.$	} Concrétions d'oxydes de manganèse dans une masse ferrugineuse - résidus de pyrolusite et braunite
	HV 25 - pyrolusite = cryptomélane	
	HV 43 - pyrolusite = romanéchine; goethite	
	HV 33 - cryptomélane - ramsdellite; todorokite; lithiophorite	
	HV 32 - Kaolinite, gel de manganèse, birnessite - cryptomélane	
HV 34 - pyrolusite = romanéchine, goethite		
2 Minerai de lentille oxydé (protore carbonaté)	HV 36 - cryptomélane; braunite et lithiophorite - cryptomélane - pyrolusite $\left\{ \begin{array}{l} \text{ramsdellite} \\ \text{nsutite} \end{array} \right.$	- au centre des concrétions de cryptomélane - en concrétions $\left\{ \begin{array}{l} \text{lithiophorite en fines pellicules entre les concrétions} \end{array} \right.$
	HV 40 - pyrolusite = gel → cryptomélane	- plages de pyrolusite "dissoutes" dans la masse de cryptomélane, pas de restes de silicates
	HV 39 - carbonates → birnessite → nsutite → ramsdellite lithiophorite	- belles plages de ramsdellite au milieu de nsutite; plages de silicates remplacées par la lithiophorite
	HV 38 - birnessite $\left\{ \begin{array}{l} \text{ramsdellite} \\ \text{nsutite} \end{array} \right.$; pyrolusite $\left\{ \begin{array}{l} \text{birnessite} \\ \text{cryptomélane} \end{array} \right.$	
	HV 11b - pyrolusite = cryptomélane	- structure en "passoire"
	HV 9a - pyrolusite $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane} \rightarrow \text{nsutite} \\ \text{todorokite} \end{array} \right.$	
	HV 9b - pyrolusite $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane} \\ \text{nsutite} \end{array} \right.$ lithiophorite	- la masse de cryptomélane renferme des paquets en feuillet de nsutite, la lithiophorite est associée à la kaolinite
	HV 8 - pyrolusite $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane} \\ \text{nsutite} \\ \text{ramsdellite} \end{array} \right.$	
	HV 7 $\left\{ \begin{array}{l} \text{carbonates} \\ \text{silicates} \end{array} \right.$ $\left\{ \begin{array}{l} \text{birnessite} \rightarrow \text{ramsdellite} \\ \text{pyrolusite} \rightarrow \text{ramsdellite} \end{array} \right.$	- des résidus de pyrolusite au milieu des plages de birnessite
	HV 6 - carbonates → birnessite, ramsdellite, nsutite	
partiellement oxydé	HV 45c - grenats $\left\{ \begin{array}{l} \text{lithiophorite; c- MnO}_2 \\ \text{cryptomélane} \end{array} \right.$	- remplacement des grenats par la lithiophorite de la périphérie vers le centre
	HV 45b - grenats braunite $\left\{ \begin{array}{l} \text{lithiophorite} \\ \text{cryptomélane c- MnO}_2; \text{ramsdellite} \end{array} \right.$	- la ramsdellite se trouve seulement dans les passages les plus oxydés
	HV 14a - grenats $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane + goethite} \\ \text{lithiophorite} \end{array} \right.$	- MnO : 8, 80% MnO ₂ : 27, 50%
	HV 17 - grenats $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane + goethite} \\ \text{lithiophorite} \end{array} \right.$	
	HV 16 - grenats $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane} \\ \text{lithiophorite} \end{array} \right.$	
	HV 5 - grenats $\left\{ \begin{array}{l} \text{cryptomélane} \\ \text{lithiophorite} \end{array} \right.$	- les grenats sont souvent entièrement remplacés par la lithiophorite; remplacement du bord vers le centre (le centre est remplacé en dernier).

== = remplacement; → = évolution directe

Tableau 4. Evolution minéralogique - Gisement de Nsuta

	Echan- tillons	Minéralogie et Paragenèse	Particularités des microstructures et des faciès
Minéral de cuirasse	GH 29	- pyrolusite = cryptomélane → ramsdellite	- ramsdellite largement cristallisée dans la cryptomélane
	GH 28	- braunite; cryptomélane } ramsdellite nsutite	- fantômes de grenats remplacés par la lithiophorite
	GH 27	- hausmannite } ramsdellite - pyrolusite = cryptomélane } nsutite	- la cryptomélane évolue en belles concrétions de nsutite et ramsdellite
	GH 20	- pyrolusite = ramsdellite cryptomélane → nsutite	- fantômes de grenats remplacés par la lithiophorite
Minéral oxydé provenant des carbonates	GH 26	- cryptomélane → nsutite; } -manganite	- la manganite est largement cristallisée (traces de carbonates)
	GH 25	- manganite } goethite → nsutite; } -manganite	- deux générations de manganite
	GH 24	- cryptomélane → nsutite; } -manganite	- la manganite tapisse des cavités-residus de plages de carbonates remplacés par la manganite et la nsutite dans une masse de cryptomélane
	GH 13	- pyrolusite = ramsdellite	
	GH 11	- pyrolusite = α-MnO ₂ (cryptomélane) nsutite → ramsdellite)	- remplacement par la lithiophorite
GH 9	- pyrolusite = ramsdellite cryptomélane → nsutite		
Protocores et minéral partiellement oxydés	GH 8	- grenats } lithiophorite cryptomélane - goethite - nsutite	- remplacement par la lithiophorite
	GH 7	- grenats - goethite - nsutite	
	GH 6	- kaolinite - gibbsite - goethite	- remplacement par la lithiophorite
	GH 18	- grenats - cryptomélane + goethite	
	GH 16	- grenats - cryptomélane + goethite	
	GH 15	- rhodochrosite → manganite	- oxydation peu avancée
GH 3	- carbonates manganésifères		

= = = remplacement; — évolution directe

lyse, ceux-ci participant à la néo-formation de lithiophorite en dehors des grenats. On note d'ailleurs, dans l'échantillon GH8, à côté de zones oxydées et enrichies, des poches blanches stériles de matériaux siliceux, complètement lessivées.

B. Carbonates

1. Mokta

Bien que des sondages aient révélé la présence de rhodochrosite dans le protore de quelques lentilles, les minerais oxydés correspondants ne montrent aucun fantôme de carbonates ni aucun rudiment de structure provenant assurément de leur transformation. Il faut préciser que les échantillons ont été prélevés dans des carrières d'exploitation encore peu profondes, loin de la limite inférieure des zones d'oxydation.

Toutefois certaines paragenèses relevant d'une oxydation avancée et observées dans des minerais riches peuvent représenter les dernières étapes d'évolution de la rhodochrosite:

groutite ___ ramsdellite
cryptomélane ___ nsutite ___ ramsdellite

2. Nsuta

Le protore carbonaté de Nsuta ne dépasse pas des teneurs en manganèse de 30 à 35 % et seuls les minerais oxydés sont exploités. Ils ont été localement épuisés et on peut échantillonner, au fond des carrières, des minerais carbonatés peu transformés. C'est le cas de GH 3b, calcschiste assez riche en manganèse, ou de GH 15 calcaire gris sombre, charbonneux, assez bien cristallisé, principalement constitué de rhodochrosite et recoupé par de nombreuses veinules de

quartz. On note un début d'oxydation avec apparition de mouchetures de manganite.

La transition au minerai complètement oxydé là où elle est observée sur le terrain, est très brutale. En quelques dizaines de centimètres, on passe du minerai carbonaté pratiquement sain à un minerai constitué exclusivement d'oxydes, vacuolaire à caverneux, avec des géodes tapissées de cristaux de manganite. Manganite, pyrolusite et cryptomélane sont les minéraux principaux de ces minerais oxydés. La transformation la plus générale est: carbonate \rightarrow manganite \rightarrow pyrolusite, la pyrolusite étant ensuite remplacée par la cryptomélane ou la nsutite (Tableau 4).

Dans les échantillons GH 9 et GH 13, où la pyrolusite domine, on observe le remplacement partiel de celle-ci directement par la ramsdellite.

Les minerais riches en manganite renferment généralement deux ou trois phases de MnO_2 , mais la pyrolusite peut être totalement absente.

L'analyse des microstructures permet de distinguer deux générations de manganite, l'une initiale, produit direct de la transformation des carbonates, l'autre tardive, largement cristallisée, apparaissant comme la phase ultime de formation du minerai.

On observe enfin des associations initiales de manganite, nsutite et cryptomélane.

3. Tambao

Si des silicates comme la téphroïte et la rhodonite ainsi que des oxydes comme la hausmannite sont rencontrés dans le protore des couches principales de Tambao (Picot et Trinquard, 1969), la forte teneur en manganèse de celui-ci, plus de 40 %, est liée principalement à la présence de rhodochrosite, souvent pratiquement pure et très largement cristallisée.

Dans les minerais oxydés on retrouve presque toujours la trame des carbona-

tes. La transformation la plus générale est:

carbonate \rightarrow birnessite \rightarrow nsutite et ramsdellite (Tableau 3).

Lorsque la pyrolusite apparaît, elle est remplacée systématiquement soit par la cryptomélane, soit par la nsutite et la ramsdellite.

III. LES CUIRASSES DE MANGANESE: MINERAI OXYDE SECONDAIRE

A. Caractères généraux

Les minerais étudiés précédemment conservent, plus ou moins estompées, des structures du protore (stratification, reliques de grenat, de braunite, de rhodochrosite...). Mais il existe, dans les trois gisements, d'autres minerais qui ne proviennent pas de la transformation in situ d'un minerai primaire, mais du dépôt secondaire de manganèse dans des altérites argileuses ou des colluvions, après un transport latéral en solution vers l'aval des versants.

Ces minerais, lorsque la dissection récente ne les a pas réduits à des blocs dispersés, forment des couches atteignant 3 à 5 m d'épaisseur, parallèles à la surface topographique, recouvertes de plusieurs mètres de matériaux meubles stériles. Ces couches représentent des horizons indurés de la base de sols ferrallitiques anciens: ce sont des cuirasses (Grandin, 1976).

Les minerais de cuirasse sont en général très riches (50 à 60 % de manganèse métal c'est à dire 80 à 95 % d'oxyde MnO_2) et entièrement concrétionnés. Dans les rares cas où des structures primaires sont observées (fantômes de grenats, faciès stratifié) il s'agit de petits éléments à contours nets qui apparaissent comme des corps étrangers dans la masse du minerai concrétionné. Ils sont d'ailleurs accompagnés d'autres corps étrangers (cailloux de quartz, gravillons ferrugineux) et correspondent à des passées grossières des sols au sein desquels se sont formées les cuirasses

de manganèse, avec des débris remaniés de minerai de lentille, de filons de quartz, de cuirasse ferrugineuse intermédiaire.

B. Mokta

Les cuirasses de manganèse sont un des traits majeurs du gisement de Mokta. Leur tonnage (15 % des réserves) et leur forte teneur ont permis par mélange de valoriser des minerais pauvres. Certaines d'entre elles sont bien conservées ainsi que des profils complets des sols associés. On voit alors qu'elles se sont formées sur d'anciens bas de pente, avant les périodes de dissection quaternaires, à une époque où le gisement apparaissait dans le relief comme une large croupe convexe dont les versants ne dépassaient pas 15 à 20 % d'inclinaison.

Les minerais de cuirasse présentent des faciès concrétionnés avec des structures en feuillets ou en fins feutrages, parfois des faciès bréchiqes. Les résidus d'argile kaolinique blanche ou rouge (ferrugineuse) sont fréquents. La présence de nombreuses racines de végétaux épigénisées par les oxydes de manganèse confirme l'origine secondaire des cuirasses et leur formation dans un sol (Grandin et Perseil, 1977).

Les associations minéralogiques les plus fréquentes sont:
cryptomélane - nsutite - ramsdellite
pyrolusite - cryptomélane.

C. Tambao

Le minerai de cuirasse revêt à Tambao un faciès analogue à celui de Mokta: concrétionné, compact ou bréchiq. Exceptionnellement on rencontre ici un faciès pisolithique: les pisolithes manganésifères, de 6 à 10 mm de diamètre, sont inclus dans une matrice argileuse. Les oxydes dominants sont d'une part la cryptomélane, d'autre part la nsutite et la ramsdellite.

Si la plupart des concrétions sont exclusivement constituées de ces minéraux, quelques-unes renferment au centre des plages de grenats transformés en lithio-

phorite, ainsi que des reliques de braunite (échantillon HV 36). La lithiophorite apparaît en fines pellicules entre les concrétions de cryptomélane ou de ramsdellite.

En revanche, la proportion de minerai de cuirasse est beaucoup plus faible à Tambao qu'à Mokta (négligeable du point de vue économique). Sans doute cela tient-il à la présence de couches interstratifiées plus puissantes, plus continues, à enracinement plus profond et à teneur plus forte. Mais de plus une dissection intense n'a laissé subsister des cuirasses que des épandages de blocs ou de petits affleurements sur des replats perchés. Les couvertures stériles meubles de sols ferrallitiques ont été décapées et seules des poches d'argile tachetée englobées dans les minerais concrétionnés trahissent leur existence passée.

D. Nsuta

Pour les minerais de cuirasse Nsuta représente un moyen terme entre Mokta et Tambao. En tonnage il s'agit d'une proportion faible mais non négligeable des réserves. Certaines cuirasses sont encore assez bien conservées. Réduites en extension par l'érosion mécanique, fracturées par le soutirage chimique dans les altérites sous-jacentes, elles conservent leur situation au sein d'un sol ferrallitique, sur des replats correspondant à d'anciens bas de pente.

La ramsdellite est le minéral le mieux représenté. La paragenèse la plus fréquente est:

pyrolusite = cryptomélane — $\left\{ \begin{array}{l} \text{ramsdellite} \\ \text{nsutite} \end{array} \right.$

La lithiophorite apparaît localement.

IV. INTERPRÉTATIONS MINÉRALOGIQUES

A. Transformation des minéraux primaires

Les composés oxydés formés au cours de l'évolution supergène des gisements

Tableau 5

- COMPOSITION CHIMIQUE DE QUELQUES MINÉRAIS -										
	Minéraux provenant des protores silicatés						Minéraux à carbonates			
	M 65 Minéral lessivé	M 68 Minéral siliceux oxydé	M 66 Minéral oxydé	M 67 Minéral oxydé	HV 14a Minéral partiel- lement oxydé	HV 5 Minéral oxydé	GH 16 Minéral oxydé lessivé	GH 15	GH 3b Résidu Soluble	
SiO ₂	83,38	26,60	11,50	9,70	30,00	15,20	61,00	14,16	4,90	
Al ₂ O ₃	5,52	7,08	4,67	3,54	17,01	15,87	18,90	1,55	19,60	1,02
Fe ₂ O ₃	1,73	4,66	3,00	2,41	3,80	6,92	3,24	0,80	1,75	8,85
TiO ₂	-	-	-	-	-	0,73	-	-	0,55	
MnO ₂	4,35	46,76	64,60	72,86	27,50	43,50	7,74	2,39	-	
MnO	0,13	6,20	7,17	5,28	8,80	4,30	-	47,14	0,06	30,10
CaO	0,34	0,35	0,80	0,70	1,63	0,05	0,26	3,00	0,11	10,70
MgO	-	-	0,20	0,30	0,54	0,06	0,31	2,40	0,59	5,20
Na ₂ O	-	0,15	0,20	0,15	0,07	0,12	1,42	0,16	0,16	
K ₂ O	-	0,44	0,64	0,32	0,38	0,32	1,74	0,08	3,33	
Li ₂ O	-	-	0,10	0,10	-	-	-	-	0,37	
BaO	-	-	-	-	-	2,60	-	-	-	
NiO	-	-	-	-	-	0,22	-	-	0,55	
CoO	-	-	-	-	-	0,19	-	-	-	
H ₂ O	0,96	6,78	6,30	5,20	8,90	10,90	3,80	0,70	0,70	
Perte au feu	3,30	-	-	-	-	-	-	CO ₂ 27,87	13,20	
									32,67	69,07
TOTAL:	99,71	99,02	99,18	100,56	98,63	100,38	98,41	100,25	101,74	

Analyste: Madame Y. Massard Laboratoire de Minéralogie du Muséum - PARIS.

Note: Le terme minéral est en fait utilisé pour des roches manganésifères sans valeur économique (oxydation incomplète, lessivage important ou teneur initiale très faible) mais l'analyse des beaux minéraux aurait moins de signification pour la compréhension de l'évolution

dépendent d'abord de la nature du proto-re.

1) Les grenats donnent une filiation: grenats - lithiophorite - cryptomélane. Celle-ci, constante, semble prouver une assez grande homogénéité des conditions d'oxydation dans les divers gisements. La pyrolusite apparaît rarement. On peut observer des passages directs grenats-cryptomélane notamment à Tambao (Tableau 3) et des évolutions en nsutite et ramsdellite, notamment à Mokta (Tableau 1).

2) Les carbonates donnent deux filiations:

- carbonate → manganite → pyrolusite avec transformation ultérieure en cryptomélane et nsutite ou en ramsdellite.
- carbonate → birnessite (→ pyrolusite) = cryptomélane et ramsdellite.

La première est très générale à Nsuta (Tableau 4). La seconde n'est observée qu'à Tambao et peut être mise au compte d'une plus forte teneur en manganèse et d'une plus grande pureté des carbonates du proto-re de ce gisement. L'oxydation est plus intense puisque la birnessite se forme et non la manganite. On peut arriver au stade de la ramsdellite bien cristallisée, avec parfois un passage direct birnessite → ramsdellite (Tableau 3).

B. La pyrolusite

Alors que la pyrolusite est généralement considérée comme l'aboutissement d'une séquence d'oxydation (Bricker 1965, Roy 1968), elle apparaît systématiquement dans les gisements étudiés, comme un produit intermédiaire. Sa transformation passe généralement par la cryptomélane

pour aboutir à la nsutite ou à la ramsdellite, parfois à des mélanges intimes de ces deux constituants. Dans quelques cas (HV 9a) on observe un remplacement de la pyrolusite par la todorokite (Fig. 6).

Des microstructures typiques de remplacement sont observées au stéréoscan: on constate une microfissuration de la pyrolusite le long des clivages (Fig. 5) avec croissance de cryptomélane dans ces fissures (Fig. 5).

La transformation a lieu, qu'il s'agisse de pyrolusite d'oxydation des carbonates ou qu'il s'agisse de veinules secondaires de pyrolusite, rencontrées dans divers minerais.

Il est à noter que les minerais de cuirasse, les plus évolués, les plus "terminaux", typiquement secondaires, sont les plus pauvres en pyrolusite et sont constitués principalement de cryptomélane et de ramsdellite.

On peut tenter de relier la place particulière de la pyrolusite à la dynamique des profils ferrallitiques. Les transformations des protores débutent dans la partie la plus profonde de ces profils, où le pH peut rester élevé, et se poursuivent, au fur et à mesure de l'abaissement de la surface topographique, dans des horizons devenant progressivement plus acides. Pour leur part les cuirasses appartiennent dès leur origine aux horizons d'un sol. Leur incision et leur mise en relief au cours du Quaternaire, parfois accompagnées de la disparition de leur recouvrement stérile meuble font de ce sol un sol ferrallitique lessivé très acide (des pH de 4 à 5 ont été mesurés au toit d'une cuirasse de Mokta).

Or, si la pyrolusite est considérée à la suite de travaux expérimentaux (Bricker 1965; Giovanoli et al., 1976) comme le bioxyde le plus stable en milieu oxydant à 25°, 1 atm., certains auteurs (Giovanoli et al., 1975) notent que la phase γ est d'autant plus stable que le pH est plus acide. Par ailleurs Bricker (1965) admet lui-même que la cryptomélane peut être la phase la plus stable dans les milieux riches en pot-

assium. Les schistes sériciteux birrimiens, encaissant les formations manganésifères, représentent un tel milieu.

Ainsi s'expliquerait l'importance de la pyrolusite dans les minerais oxydés profonds issus de l'altération directe des protores, et notamment des protores carbonatés qui retardent l'acidification du milieu, et l'aspect dominant de la cryptomélane et des phases γ dans les minerais superficiels, et notamment les cuirasses.

Il n'en reste pas moins que l'on observe localement des veinules de pyrolusite largement cristallisée dans des minerais de cuirasse affleurants. Ceci échappe à la tentative d'interprétation précédente. Mais même dans ce cas, on observe de très nets remplacements de cette pyrolusite par la cryptomélane puis de celle-ci par la nsutite (Fig. 7).

C. La nsutite

Le nom même de nsutite rappelle que le gisement de Nsuta doit à ce minéral sa valeur commerciale et d'avoir longtemps tenu le premier rang mondial pour la production de minerai de piles. Mais la nsutite, certes en proportion plus faible, existe également à Tambao et à Mokta. Dans ce dernier gisement elle apparaît même bien cristallisée dans les joints de stratification et les veinules d'une lentille que ces cristallisations, visibles à l'oeil nu, avaient fait baptiser "lentille à pyrolusite".

En fait il faut bien voir que le minerai de piles ne nécessite pas seulement une forte proportion de nsutite. La teneur de manganèse doit être élevée et surtout la teneur de fer très faible (les limites imposées à Nsuta étaient de plus de 52 % de manganèse métal et moins de 1,5 % de fer), une assez forte teneur de silice pouvant être tolérée. Cela désavantage les minerais des protores à grenats, souvent ferrugineux, et les minerais des amas de blocs superficiels mêlés de concrétions et couverts de cortex à wads, limonites et argiles ferrugineuses. Ceux-ci sont classés en minerais métallurgiques même si leur

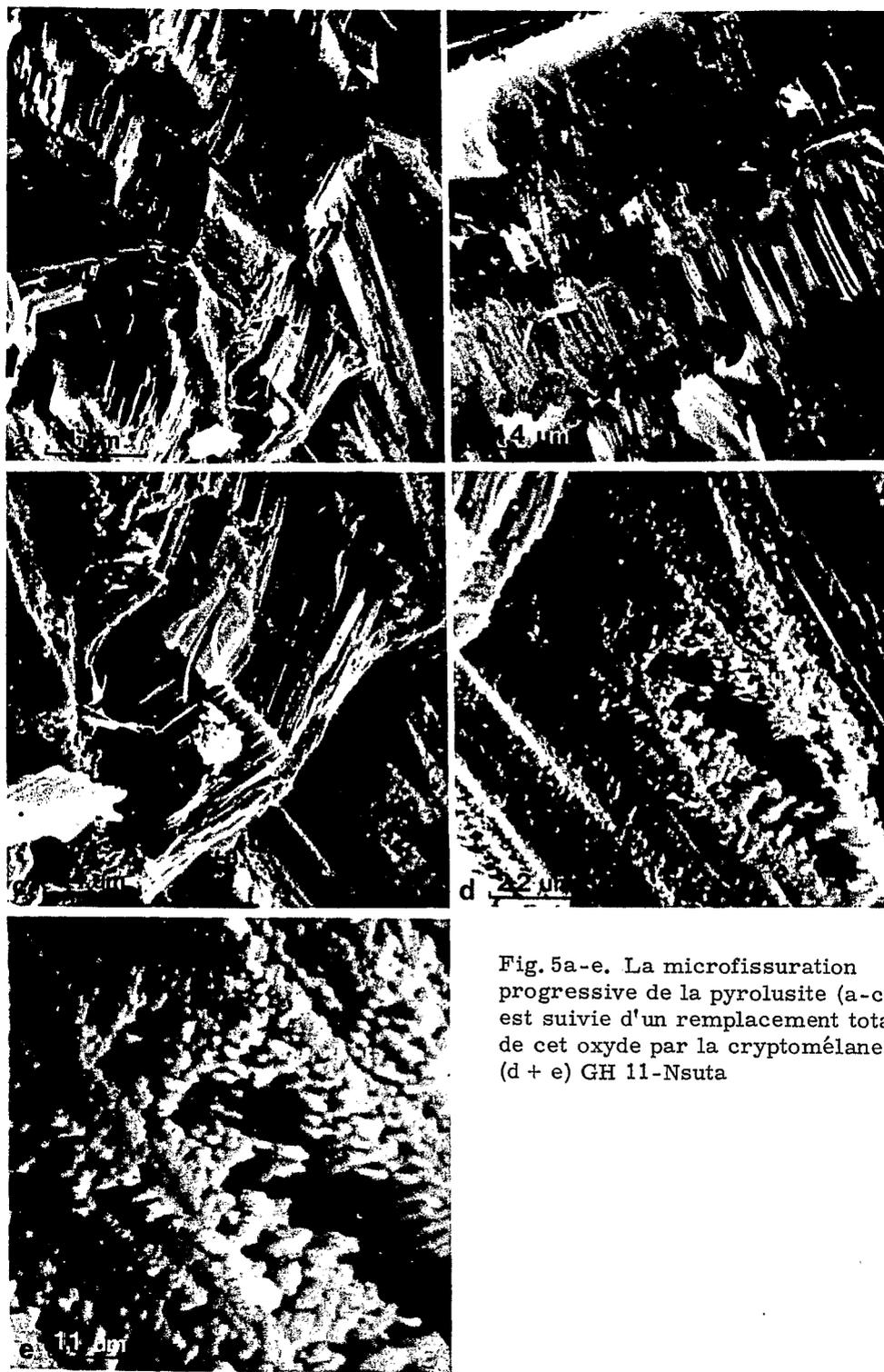


Fig. 5a-e. La microfissuration progressive de la pyrolusite (a-c) est suivie d'un remplacement total de cet oxyde par la cryptomélane (d + e) GH 11-Nsuta

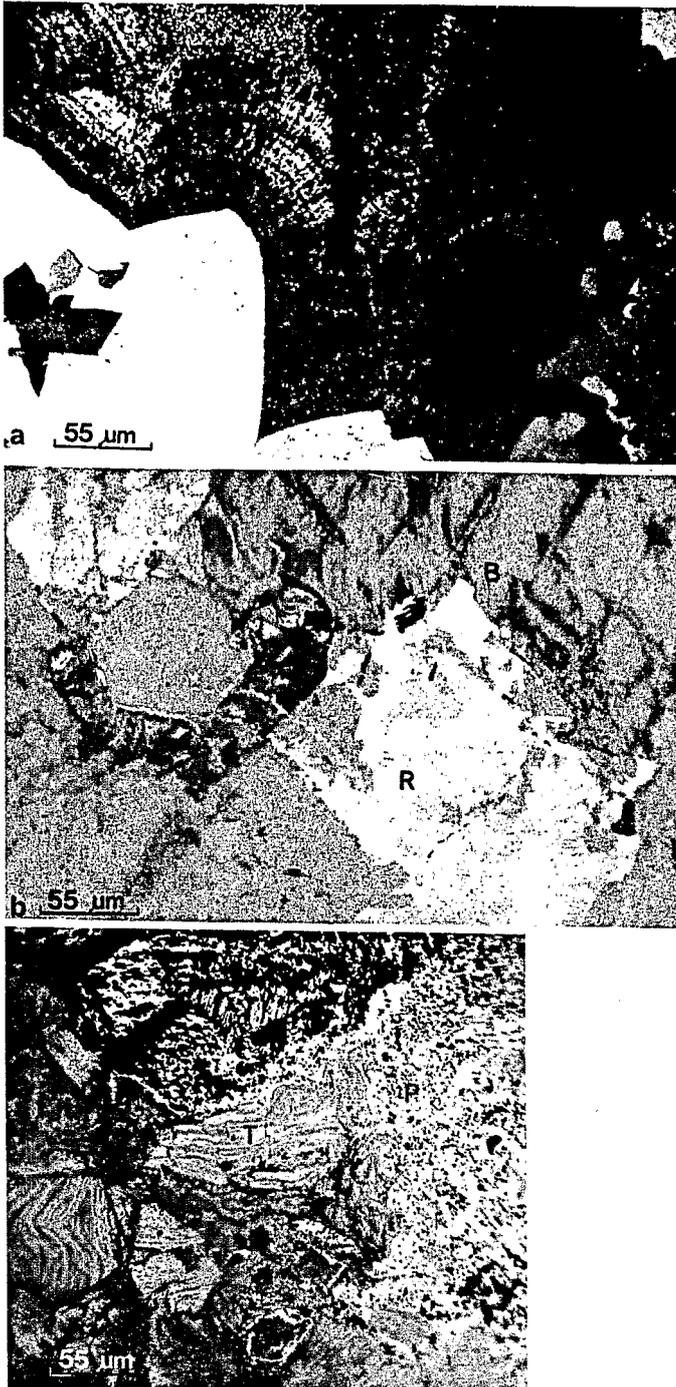


Fig. 6a-c. **a:** Association de nsutite et manganite (GH20-Nsuta); nicols croisés. **b:** Evolution de la rhodochrosite → birnessite (B) → ramsdellite (R) (HV6-Tambao); Lumière naturelle, **c:** Remplacement de la pyrolusite (P) par la todorokite (T) (HV9a-Tambao); Lumière naturelle.

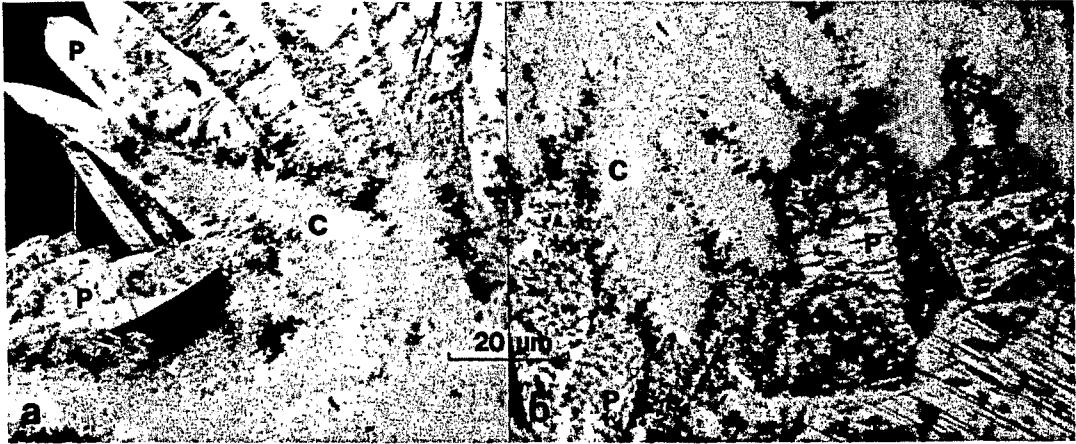


Fig. 7a + b. Remplacement général de la pyrolusite (P) par la cryptomélane (C)
 a: Gisement de Mokta (SS5). b: Gisement de Nsuta (GH11); on observe encore des
 plages résiduelles de pyrolusite dans la cryptomélane

teneur de manganèse est forte. Au contraire les carbonates ou les schistes carbonatés pauvres en fer donnent des minerais oxydés interstratifiés de composition chimique favorable. C'est le cas d'un minerai primaire de Nsuta comme GH 15:47,1 % de MnO (76 % de rhodochrosite), 2,4 % de MnO₂, 14,2 % de SiO₂ et seulement 0,8 % de Fe₂O₃.

Il n'en reste pas moins que les meilleures concentrations de nsutite apparaissent dans des minerais dérivés de carbonates et lorsque l'oxydation ménage des termes intermédiaires comme c'est le cas à Nsuta avec la transformation: carbonate → manganite → pyrolusite et cryptomélane. Il est à noter que la nsutite provient fréquemment de la cryptomélane et que l'on n'observe jamais de passage nsutite → pyrolusite, l'évolution de la nsutite donnant toujours de la ramsdellite. Ce dernier minéral, particulièrement bien représenté dans les cuirasses, apparaît comme le plus stable dans le contexte des gisements étudiés.

D. La manganite

La manganite s'observe au cours de la première étape d'évolution des carbonates de Nsuta, à proximité des fronts

d'oxydation. Mais déjà à cette étape, on distingue, à côté de manganite de remplacement direct, formée dans la trame des schistes carbonatés, une manganite bien cristallisée tapissant les vides des minerais caverneux qui apparaissent quand la texture s'effondre, le volume occupé par les oxydes étant inférieur à celui des carbonates correspondants.

Plus curieusement on trouve également la manganite en veinules secondaires bien cristallisées, apparaissant comme la phase terminale de certains minerais oxydés. Dans une même section on peut ainsi observer plusieurs générations de manganite. Il faut admettre qu'à côté du manganèse oxydé in situ en minéraux intermédiaires et poursuivant ensuite sa transformation en minéraux évolués du type cryptomélane-nsutite, une partie du manganèse libéré des carbonates migre en solution, sur des distances suffisantes pour pouvoir rencontrer du minerai déjà évolué et y provoquer l'apparition de nouvelles séquences débutant par le dépôt de manganite. Si l'on exclut des circulations remontantes, que rien ne permet de supposer à Nsuta, cela implique soit des irrégularités fortes de la limite oxydes-carbonates dans le sens du mouvement latéral des solu-

tions, soit un relèvement temporaire du niveau des nappes induit par des variations du climat (colmatage des bas-fonds, modification de la couverture végétale diminuant l'évapotranspiration...). L'apparente stabilité de la manganite tardive resterait toutefois à expliquer.

V. CONCLUSIONS

Les contextes climatiques actuels des trois gisements étudiés sont extrêmement contrastés, tout comme leur couverture végétale et la dynamique de leurs sols: Tambao est situé aux confins semi-désertiques de la steppe sahélienne du nord de la Haute-Volta, Mokta dans la forêt sempervirente équatoriale du sud de la Côte d'Ivoire. S'agissant de gisements enrichis par altération météorique, on aurait pu s'attendre à observer des différences d'évolution minéralogiques très marquées. En fait si des différences existent, elles sont principalement liées à la nature carbonatée ou silicatée des protores précambriens et s'observent aussi bien sur un même gisement comportant des minerais primaires des deux types, que d'un gisement à l'autre. Pour un minerai primaire donné les différences d'évolution d'un gisement à l'autre sont assez réduites.

Cela confirme les résultats des études géomorphologiques (formation du relief, altération, nature et répartition des matériaux superficiels). Celles-ci ont souligné l'existence d'une phase majeure d'enrichissement fin-tertiaire. A cette époque des climats humides permettant l'altération kaolinique et la ferrallitisation ont dominé toute la zone concernée, sur plus de 10° de latitude. Par la suite, tandis que se dessinait, à travers de nombreuses fluctuations, la répartition actuelle des climats avec un fort gradient de la pluviosité, les gisements ont perdu par ablation une partie des stocks de minerais superficiels antérieurement accumulés. Selon les conditions locales, la poursuite de l'oxydation des couches interstratifiées ou celle du cuirassement manganésifère ont pu compenser partiellement les pertes. Mais l'essentiel des

minerais oxydés actuellement observés et donc des paragenèses décrites, est le résultat de transformations déjà anciennes, sans relation directe avant le contexte climatique actuel.

Parmi les minéraux formés, deux familles se distinguent:

- des minéraux transitoires d'oxydation des protores, manganite et birnessite issues des carbonates, lithiophorite issue des grenats.

- des minéraux stables formant l'essentiel des minerais oxydés riches: cryptomélane, nsutite, ramsdellite.

La pyrolusite joue un rôle intermédiaire entre ces deux groupes, relayant les minéraux transitoires des protores carbonatés ou apparaissant dans les minerais secondaires formés à partir de la migration de solutions manganésifères dans les sols, mais toujours pour subir une transformation plus ou moins avancée en cryptomélane puis en nsutite ou ramsdellite. Cette relative instabilité de la pyrolusite est un résultat assez inattendu qui peut être mis en relation avec la forte acidité des sols et la richesse en potassium du contexte de schistes séréciteux.

Dans les minerais les plus superficiels, les différences s'estompent entre minerais de lentille issus de l'oxydation directe du protore et minerais de cuirasse formés secondairement par dépôt dans les sols de bas de pente. Toutefois les premiers restent le domaine d'élection de la nsutite, les seconds celui de la ramsdellite.

BIBLIOGRAPHIE

- Black, R. : Sur l'ordonnance des chaînes métamorphiques en Afrique Occidentale - *Chr. Mines* 364, 225-38 (1967)
 Bonhomme, M. : Contribution à l'étude géochronologique de la plateforme ouest africaine - Thèse Ann. Fac. Sci. Clermont Ferrand (Géol. et Min.) 1962

- Boulet, R. : La géomorphologie et les principaux types de sols en Haute-Volta septentrionale - cah. ORSTOM, sér. Pédol. 8, 245-271 (1970)
- Bricker, O. P. : Some stability relations in the system $Mn-O_2-H_2O$ at 25° and one atmosphere total pressure. Amer. Mineral. 50, 1296-1354 (1965)
- Eschenbrenner, V., Grandin, G. : La séquence de cuirasses et ses différenciations entre Agnibilékrou et Diébougou (Haute-Volta) - Cah. ORSTOM, sér. Géol. 2, 205-246 (1970)
- Gavaud, M. : Étude pédologique du Niger Occidental - rapport général - Rapport ORSTOM, multigr. 1, 248 (1966)
- Giovanoli, R., Bürki, P., Giuffredi, M. : Layer structured manganese oxide hydroxides. IV: The buserite groupe; structure stabilization by transition elements. Chimia 29, fasc. 12, 517-520 (1975)
- Giovanoli, R., Feitknecht, W., Georges, P. : Homogene Keimbildung und Keimwachstum von γ - MnO_2 . Chimia 30, fasc. 5, 268-269 (1976)
- Grandin, G. : Aplatissements cuirassés et enrichissements des gisements de manganèse dans quelques régions d'Afrique de l'Ouest. Mém. ORSTOM n°82, 276 pages. 1976
- Grandin, G., Perseil, E. A. : Le gisement de manganèse de Mokta (Côte d'Ivoire). Transformation minéralogiques des minerais par action météorique. Bull. Soc. Geol. Fr. 2, 309-317 (1977)
- Michel, P. : Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie, étude géomorphologique - Mém. ORSTOM 63, 752 (1973)
- Picot, P., Trinquard, R. : La manganosite (MnO) du gîte de manganèse de Tambao (Haute-Volta). Bull. Soc. fr. miner. Cristallogr. 92, 500-502 (1969)
- Rocci, G. : Essai d'interprétation de mesures géochronologiques. La structure de l'Ouest africain - Coll. intern. CNRS, Géochronologie absolue, Nancy 151, 257-273 (1965)
- Roques, M. : Le Précambrien de l'Afrique occidentale française - Bull. Soc. Géol. Fr. 5ème Ser. 18, 589-628 (1948)
- Roy, S. : Mineralogy of the different genetic types of manganese deposits - Econ. Geol. 63, 760-786 (1968)
- Vogt, J. : Aspects de l'évolution morphologique récente de l'Ouest Africain - Ann. Géogr. Fr. 68, 367, 193-206 (1959)

Recu le 21 décembre 1977

Dr. Mme. E. A. Perseil
Muséum National d'Histoire Naturelle
Laboratoire de Mineralogie
61, rue de Buffon
75005 Paris
France