

Les sulfates de fer de Saghand près de Yazd (Iran)

par PIERRE BARIAND *, FABIEN CESBRON * et JEAN-PAUL BERTHELON *

Résumé. — L'altération en climat aride de gisements de pyrite disséminée conduit à un développement important de zones d'oxydation qui peuvent être très riches en minéraux secondaires.

La petite mine de Saghand située au Nord de Yazd (Iran) et anciennement exploitée pour les aluns a fourni une abondante paragenèse comprenant de nombreux mais rares sulfates de fer et d'aluminium :

— sulfates de fer : szomolnokite, copiapite, butlélite et para-butlélite, amarantite, roemerite, voltaïte, métavoltine, coquimbite, etc. ;

— sulfates d'aluminium : alunogène, tamarugite et khademite, ce dernier minéral de formule $\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ étant une espèce nouvelle.

La formation de ces différents minéraux, l'évolution du degré d'oxydation et les éventuelles transformations ont été étudiées.

Abstract. — Alteration in an arid climate of deposits of disseminated pyrite leads to an important development of oxidation zones that can be very rich in secondary minerals.

The small mine of Saghand situated North of Yazd (Iran) and formerly worked for alums has furnished an abundant suite comprising numerous but rare sulfates of iron and aluminium.

— Iron sulfates : szomolnokite, copiapite, butlerite and para-butlerite, amarantite roemerite, voltaite, metavoltine, coquimbite, etc.

— Aluminium sulfates : alunogen, tamarugite and khademite, this last mineral with a formula $\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ being a new species.

The formation of these different minerals, the evolution of the degree of oxidation and the eventual changes have been studied.

L'Iran est un pays de 1 648 000 km² situé entre 44° et 64° de longitude Est et entre 25° et 40° de latitude Nord. Le climat est dans l'ensemble continental si l'on excepte les zones côtières de la mer Caspienne et de la mer Noire. D'une manière générale les étés sont chauds avec des températures diurnes dépassant fréquemment 40° C.

La connaissance de ce pays a beaucoup progressé grâce aux travaux des compagnies pétrolières. Depuis une dizaine d'années, la création d'un service géologique iranien a permis une recherche plus systématique des ressources du pays, notamment par l'établissement de la carte géologique. En ce qui concerne les gisements métallifères, l'Iran, malgré une tradition minière très ancienne, reste assez neuf et ses richesses minérales sont encore assez mal connues au moins en ce qui concerne les métaux modernes.

L'étude de plusieurs zones d'oxydation trouvées dans les déserts iraniens a mis en évidence l'existence de paragenèses riches en sulfates de fer, comparables à celles trouvées au Chili (Chuquicamata, Quetena) ou aux États-Unis (San Raphaël Swell dans l'Utah).

UTILISATION DES SULFATES EN IRAN.

L'artisanat du tapis a fait de l'Iran le seul pays où les indices de sulfates ont été exploités. Les sulfates d'aluminium transformés en aluns étaient utilisés comme mordant au cours de la préparation des laines.

La façon de teindre généralement en usage en Iran est la suivante :

« Le fil est d'abord dégraissé dans de l'eau chaude pendant une demi-heure environ ; s'il est très gras, on ajoute 3 % de carbonate de sodium avec un peu de savon. Ensuite, on le trempe pendant environ douze heures dans un premier bain d'alun puis dans un deuxième ; cette deuxième opération est parfois remplacée par la cuisson, pendant une heure, du fil dans le bain d'alun. La teinture proprement dite commence par la préparation du colorant que l'on dilue dans une cuve : la quantité d'eau varie suivant

* Lab. de minéralogie-cristallographie associé au C.N.R.S., Univ. P.-et-M.-Curie, Paris.

Manuscrit remis le 12 avril 1976.

la nuance désirée. La laine dégraissée est placée dans ce bain de teinture qui est porté à ébullition. Après cuisson d'une heure environ, la laine est laissée à refroidir dans la teinture pendant douze heures. Elle est ensuite rincée, de préférence dans une rivière » [E. G. Ruedin, 1971].

Ces aluns $KAl(SO_4)_2 \cdot 12H_2O$ étaient obtenus par calcination et lixiviation d'alunite $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$ et d'halotrichite $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$. Pour les teintures, les couleurs rouges étaient obtenues à partir de mélanges de divers sulfates ferriques comme l'amarantite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 3H_2O$ ou le botryogène $MgFe(SO_4)_2(OH) \cdot 7H_2O$ [H. Bidder, 1964].

Depuis le début du xx^e siècle ces techniques artisanales ont progressivement laissé place à l'industrie chimique ; toutes les mines sont maintenant abandonnées.

Les sulfates sont des minéraux provenant de l'altération des sulfures. Longtemps délaissés par les géologues, ils commencent à être étudiés avec soin, leur connaissance pouvant apporter des renseignements intéressants sur les minéralisations sous-jacentes. Chaque formation de sulfates ne cache pas nécessairement un gisement, mais il est l'indice d'une formation riche en sulfures disséminés, surtout de pyrite, celle-ci pouvant éventuellement être accompagnée d'autres sulfures plus intéressants. L'identification rapide de chaque espèce peut être difficile sans les techniques de laboratoire, mais certaines, plus classiques, comme la jarosite $KFe_3(SO_4)_2(OH)_6$, ou l'alunite $KAl_3(SO_4)_2(OH)_6$, deviennent de véritables guides miniers, particulièrement dans la recherche des gisements de type « porphyry-copper ».

De ses voyages en Perse (1830-1835) Tietze rapporta de nombreux échantillons que Blass étudia en 1884 ; des sulfates et des espèces nouvelles ont ainsi été identifiés pour la première fois. Nous ne sommes pas certains que les zones d'altérations que nous avons pu voir soient les mêmes que celles citées par Blass car les noms qu'il indique pour localiser les mines sont souvent assez communs (Siah Kuh, qui signifie montagne noire, est employé pour désigner une dizaine de sommets iraniens.)

GÉNÉRALITÉ SUR L'ALTÉRATION DES SULFURES.

L'oxydation d'un minerai sulfuré est étroitement liée au régime des eaux et dépend donc directement du climat. La circulation descendante ou montante des eaux souterraines permet de distinguer deux cas :

Altération en climat humide. Les eaux de pluie s'infiltrant dans le sol pour atteindre la nappe phréatique. Plusieurs zones sont à considérer :

— *Le chapeau de fer.* D'une manière générale, lorsqu'un dépôt métallifère est exposé en surface, le processus d'altération conduit à la formation d'un

chapeau de fer. Ce chapeau, composé de roches fortement limonitisées, représente un obstacle à l'étude des gisements. La limonite est un mélange d'hydroxydes (gœthite, lépidocrocite), d'oxydes (hématite) et de sulfates (jarosite, natrojarosite). L'étude des limonites s'est développée depuis une dizaine d'années et il apparaît que la connaissance de la structure, de la composition chimique et de la couleur peut apporter de précieux renseignements sur les minéralisations profondes.

— *La zone d'oxydation.* Dans cette zone située au-dessus de la surface piézométrique, les eaux météoritiques, chargées en oxygène et en gaz carbonique, circulent vers le bas. Ces eaux lessivent les éléments chimiques de la roche et oxydent les minéraux primaires. C'est à ce niveau que l'on trouve les minéralisations secondaires, en particulier les sulfates. L'importance de cette zone dépend de facteurs régionaux (climat, tectonique locale, caractères particuliers des corps minéralisés).

— *Zone de céméntation.* Les eaux sulfatées, formées dans la zone d'oxydation, descendent sous le niveau de la nappe phréatique et rencontrent un milieu réducteur qui les fait précipiter partiellement. Les éléments se déposent sous la forme de sulfures et d'oxydes et parfois à l'état natif.

— *Zone de stagnation.* A ce niveau l'eau n'est plus oxygénée, le minerai primaire n'est pas modifié.

Altération en climat aride. En Iran, le climat est aride et l'altération se fait différemment. L'évaporation au niveau du sol fait remonter l'eau de la nappe phréatique. Ces eaux s'oxygènent en montant, pour former des solutions qui oxydent le minerai primaire. La zone d'oxydation se retrouve ainsi directement au-dessus du minerai primaire. Le chapeau de fer peut être assez réduit et ne doit son existence qu'aux rares précipitations qui hydrolysent en surface les minéraux de la zone d'oxydation. C'est ce second schéma que l'on retrouve dans les déserts iraniens.

GÉOCHIMIE DE LA MINE DE SAGHAND (IRAN).

Saghand (fig. 1 et 2).

Saghand est un petit village situé au Sud du Dasht-e-Kavir (désert de sel). La mine, maintenant abandonnée, se trouve dans le massif de Kuh-e-Posht-e-Sorkh situé à une trentaine de kilomètres au Sud-Est du village. Ce massif est constitué par une série métamorphique précambrienne composée de schistes, phyllites et quartzites (formation Task), marbres, dolomies et gneiss (gneiss de Zamanabad). Un granite cambrien recoupe à l'Est toute la série.

Les travaux ont été effectués à la charnière d'un pli anticlinal dans une zone où la roche encaissante est un schiste riche en matière organique. Cette

roche ext
brèche de

Les cor
à la form
de carac
constitué
tenir cor
précipitat
températi
solutions
la surface

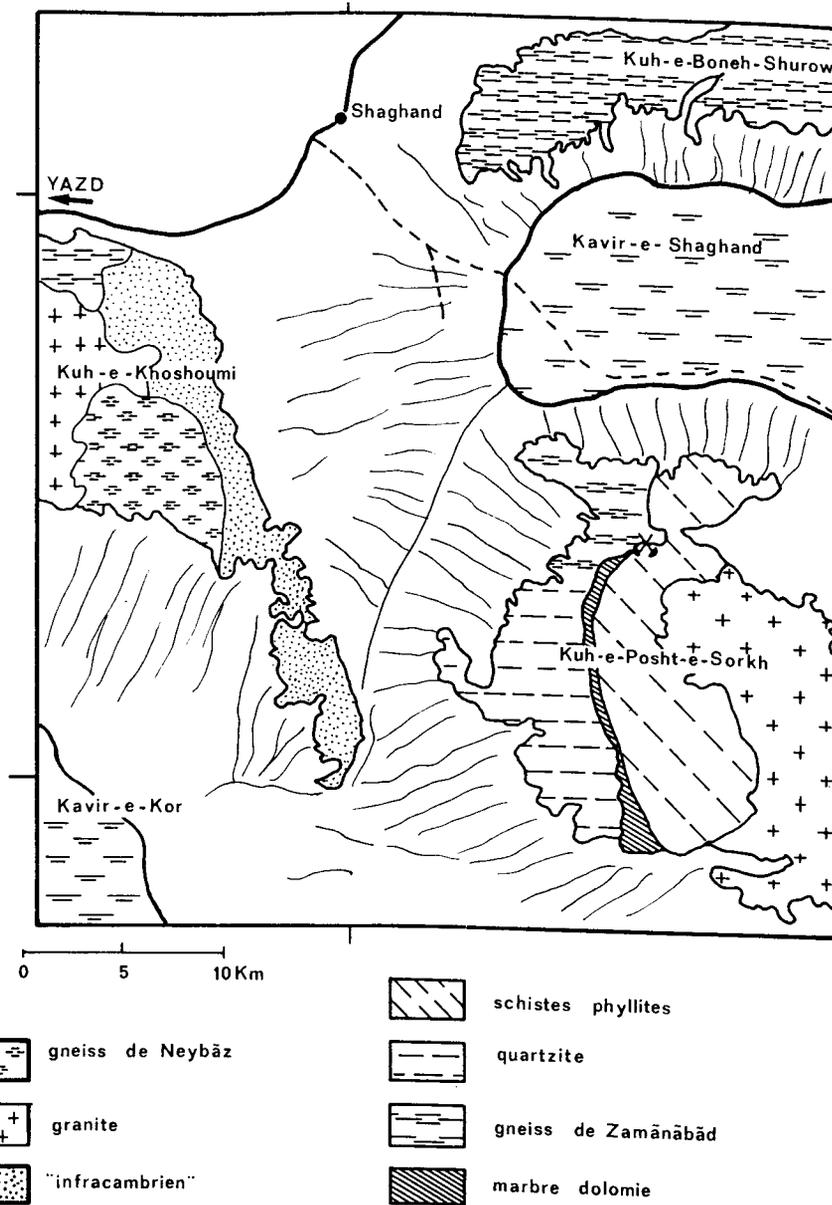


FIG. 1. — Carte géologique simplifiée de la région de Saghand.

roche extrêmement fracturée a formé une véritable brèche dont les sulfates constituent le ciment.

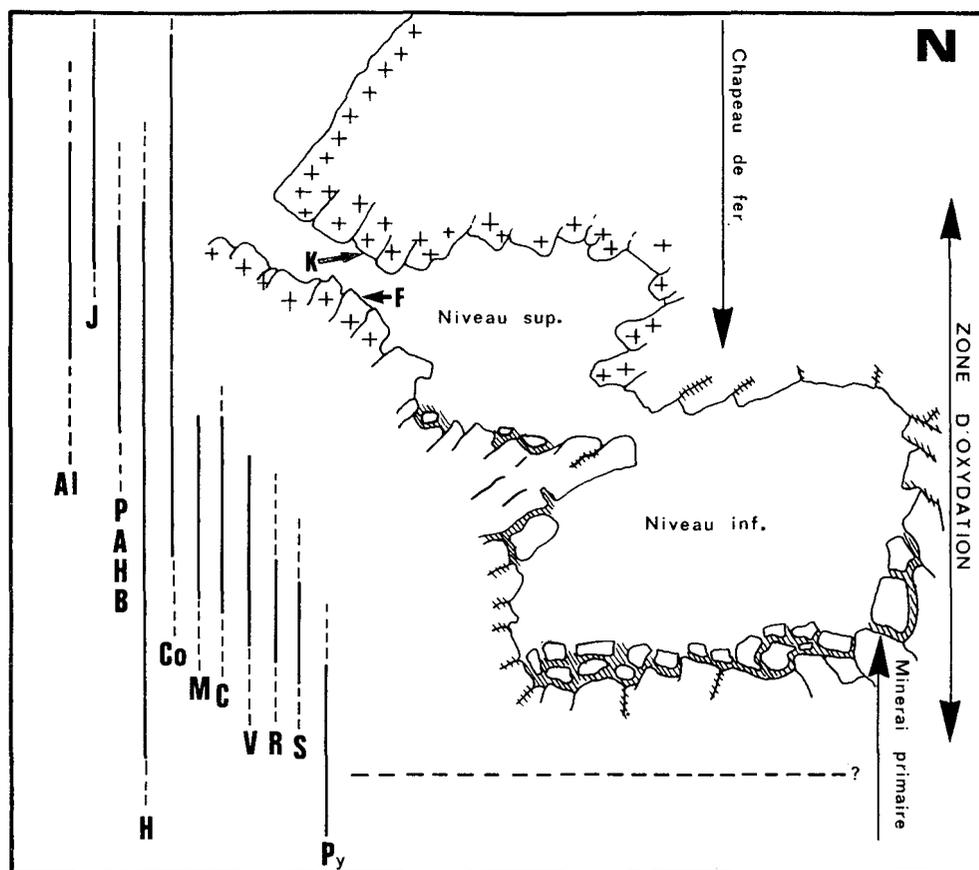
Les conditions très exceptionnelles qui ont conduit à la formation de telles minéralisations ne sont pas de caractère géologique, le minerai est en effet constitué exclusivement de pyrite et il faut plutôt tenir compte des conditions climatiques. Le peu de précipitations lié à une forte évaporation due à des températures diurnes de plus de 50° C permet aux solutions de se concentrer puis d'être pompées vers la surface. La zone d'oxydation n'est pas réduite par

un chapeau de fer important et la zone de cimentation est inexistante du fait de la circulation ascendante des solutions.

La baisse générale du niveau de la nappe phréatique actuellement enregistrée en Iran, tend à augmenter tous ces phénomènes. Il faut aussi considérer le fait que ces altérations sulfatées ont été travaillées, ce qui a permis une circulation plus libre des solutions et une cristallisation plus rapide des sulfates sur les parois.

L'organisation générale de cette altération corres-

COUPE VERTICALE DE LA MINE DE SAGHAND



H Halotrichite	AI Alunogène	+ + Zone limonitisée
C Coquimbite	Co Copiapites	▨ Fissures consolidées par de l'Halotrichite
V Voltaïte	M Métavoltine	- - - Niveau de la nappe phréatique
R Roemérite	P Parabutlélite	K Khademite
S Szomolnokite	B Butlélite	F Fibroferrite
Py Pyrite	A Amarantite	J Jarosite

FIG. 2. — Coupe verticale de la mine de Saghand.

pond donc au schéma classique d'une altération de pyrite sous un climat aride. Nous nous sommes attachés à comprendre les différentes paragenèses observées à chaque niveau de la mine.

Minéralogie.

Le tableau I donne la liste complète des sulfates observés au niveau de la zone d'oxydation. La qualité et la quantité des minéraux trouvés et observés a permis de préciser des valeurs établies

auparavant sur des échantillons de moindre qualité. Les paramètres de la szomolnokite ont pu être mesurés, une nouvelle espèce : la khademite a été décrite. Les analyses thermopondérales et thermogravimétriques ont été faites de façon systématique afin de connaître la stabilité de ces minéraux en fonction d'une élévation de température. Les analyses chimiques des minéraux ont donné des résultats correspondant aux valeurs admises. C'est à partir de cette paragenèse que l'étude géochimique est envisagée.

SULFATES DE F

Jarosites 3.....	(Métahom
	Hohmannit
	Amarantit
	Parabutlélite
	Butlélite
	(Fibrofer
	Coquimbit
Métavoltines 3....	Copiapit
	Magnési
	Voltaïte
	Voltaïte

TABLEAU REGROUPANT

Ils sont classés c dans la mine. Les actuelles. Ils ont Degré d'oxydation n' = nombre d'ions n" = nombre d'ions

Phénomèr

Le but es de la mine ; l'altération en évidence à illustrer sulfatee (fig

L'altération variées, la un degré c En exemp faite sur la partie la ph par un noy. en pyrite c ment altéré

La pyrit sulfates fe ferreux-ferr dépôts supé la coquimb

Nous av présentait du niveau c de la positi tous les éch

SULFATES DE FER	SULFATES D'ALUMINIUM
Jarosités 3.....	
(Métahohmannite) 3.....	
Hohmannite 3.....	
Amarantite 3.....	
Parabutlérinite 3.....	
Butlérinite 3.....	
(Fibroferrite) 3.....	
	Khadémite.....
	Tamarugite.....
	Alunogène.....
Coquimbite 3.....	
Métavoltines 3.....	
Copiapites 2,90.....	
Magnésiocopiapite 2,90.....	
Voltaïte verte 2,83.....	
Roemérite 2,66.....	
Voltaïte noire 2,55.....	
Halotrichite.....	
Szomolnokite 2.....	

TABLEAU REGROUPANT TOUS LES SULFATES RENCONTRÉS À SAGHAND

Ils sont classés du bas vers le haut suivant l'ordre dans lequel ils sont apparus dans la mine. Les minéraux entre parenthèses sont instables dans les conditions actuelles. Ils ont été déposés par les solutions sulfatées.

Degré d'oxydation du minéral : $Z = \frac{2n' + 3n''}{n' + n''}$

n' = nombre d'ions Fe^{2+}

n'' = nombre d'ions Fe^{3+}

TABL. I

Phénomènes d'altération.

Le but est de faire ressortir une zonalité au niveau de la mine ; pour cette raison il faut d'abord envisager l'altération à l'échelle de l'échantillon afin de mettre en évidence les associations minérales qui serviront à illustrer les variations de qualité de la solution sulfatée (fig. 3).

L'altération s'est faite sur des blocs de tailles variées, la coupe des échantillons montre toujours un degré d'altération croissant à partir du cœur. En exemple, nous pouvons donner l'observation faite sur la coupe fraîche d'un bloc prélevé dans la partie la plus basse de la mine. Le cœur est constitué par un noyau de roche saine : schiste bitumeux riche en pyrite disséminée, entouré par une roche fortement altérée.

La pyrite est remplacée tout d'abord par des sulfates ferreux (szomolnokite) puis des sulfates ferreux-ferriques (voltaïte, copiapite, roemérite). Des dépôts superficiels, principalement constitués par de la coquimbite, recouvrent entièrement l'échantillon.

Nous avons pu ainsi observer que chaque bloc présentait une association minérale caractéristique du niveau où il a été prélevé. Le relevé systématique de la position et de la composition minéralogique de tous les échantillons est résumé dans le schéma de la

mine. Trois zones sont alors définies par leurs associations minérales caractéristiques en sulfate de fer :

Zone inférieure : szomolnokite, voltaïte, roemérite,

Zone intermédiaire : coquimbite, métavoltine,

Zone supérieure : minéraux de type $FeSO_4(OH) \cdot xH_2O$.

Cette zonalité qui paraît évidente après l'étude des échantillons au laboratoire ne l'est pas du tout à l'observation sur le terrain. Plusieurs phénomènes secondaires ont tendance à la masquer :

— Le même minéral peut se présenter sous plusieurs faciès, ce qui rend les rayons X souvent nécessaires à la détermination.

— *Remise en solution* de minéraux très solubles tels que la coquimbite ou la roemérite. Ces remises en solution permettent à ces minéraux de recristalliser ailleurs sous la forme de dépôts superficiels qui ne sont pas caractéristiques de leur niveau et qui cachent les minéralisations antérieures.

— *Lessivage* de certains minéraux par des solutions très acides ; la pseudomorphose d'halotrichite $FeAl_2(SO_4)_4 \cdot 22H_2O$ en szomolnokite $FeSO_4 \cdot H_2O$ a pu être observée en plusieurs endroits.

— *Transformations*, après dépôt, de minéraux non stables dans les conditions d'humidité et de température qui règnent dans la mine. De nombreuses hydratations ou deshydratations, irréversibles ou non, ont ainsi pu être observées, soit naturellement :

Fibroferrite \longrightarrow Butlérinite
 $Fe(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O \xrightarrow{94^\circ} Fe(SO_4)(OH) \cdot 2H_2O + 3H_2O$

Amarantite \longrightarrow Hohmannite
 $2Fe(SO_4)(OH) \cdot 3H_2O + H_2O \longrightarrow Fe_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 7H_2O$

soit artificiellement par analyses thermiques ou par variation de la pression partielle de vapeur d'eau.

Hohmannite \longrightarrow Métahohmannite
 $Fe_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 7H_2O \longrightarrow Fe_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 3H_2O + 4H_2O$

Nous pouvons considérer tous ces sulfates, formés après le dépôt par la solution, comme étant de « seconde génération ».

L'étude est également gênée par deux minéraux dont le domaine de stabilité est suffisamment étendu pour qu'ils soient retrouvés à chaque niveau de la mine. Les copiapites $Fe^{2+}Fe_4^{3+}(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$ qui peuvent être magnésiennes ($MgFe_4(SO_4)_6(OH)_2 \cdot 20H_2O$) se retrouvent aussi bien dans la zone intermédiaire qu'en surface, en association avec la limonite. Le dosage du fer sous ses deux états nous a montré que le degré d'oxydation de ces minéraux est croissant du bas vers le haut de la mine.

L'halotrichite constitue quantitativement 80 % des sulfates rencontrés. Elle cimenter les blocs de

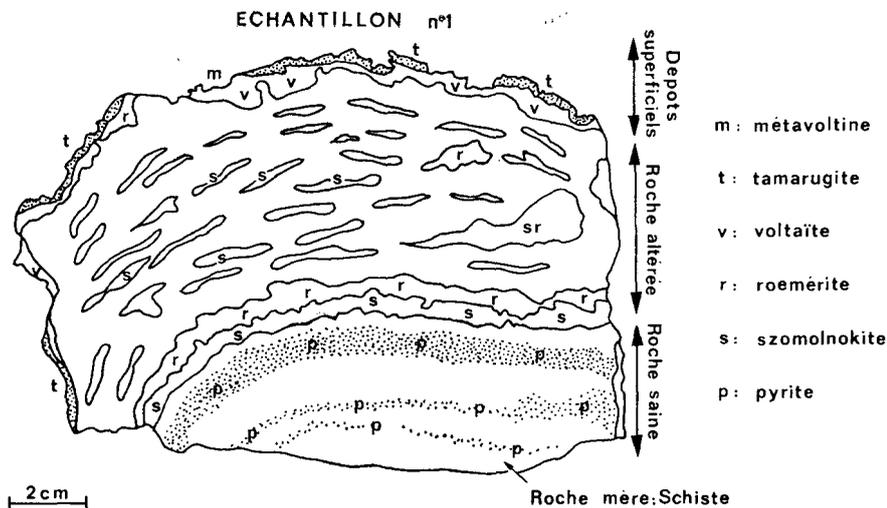


FIG. 3. — Coupe faite dans un échantillon de la mine basse.

roches altérées et représente une gêne évidente pour la caractérisation des espèces qui lui sont intimement liées. Donc seule une étude détaillée de chaque échantillon peut conduire à considérer la zonalité telle qu'elle est envisagée sur la figure 3.

Signification géochimique des espèces rencontrées.

La présence d'un seul sulfure, la pyrite, et une gangue inactive conduisent à une zone d'oxydation de composition chimique relativement simple puisque deux éléments sont à considérer : le fer et l'aluminium. Les alcalins : magnésium, sodium, potassium ayant une importance quantitative faible ne s'expriment pas dans des minéraux qui leur seraient caractéristiques mais entrent dans la composition de certains sulfates de fer ou d'aluminium.

Nous allons maintenant envisager la signification que peut avoir chaque minéral par rapport à la solution qui l'a déposé.

Les sulfates de fer.

La szomolnokite $\text{Fe}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$ monoclinique. La szomolnokite est un minéral assez commun des zones arides. Nous l'avons trouvé à Saghand : soit en poudre blanche, soit en masses verdâtres ; les cristaux bien individualisés sont de couleur vert clair et s'altèrent rapidement à l'air en poudre blanche. Nous avons observé sur quelques échantillons de l'halotrichite pseudomorphosée en szomolnokite poudreuse. Ce minéral n'a été trouvé que sur des échantillons contenant de la pyrite, c'est-à-dire toujours près du sulfure. Sa formation demande une solution très acide et peu oxygénée ne contenant que du fer, sinon celui-ci s'exprime plus aisément sous la forme d'halotrichite. Très soluble, il est rapidement remis

en solution mais contrairement à d'autres, il résiste à une élévation de température.

La copiapite $(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg})\text{Fe}_4^{3+}(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 20 \text{H}_2\text{O}$ triclinique. Ce minéral, que l'on trouve couramment dans les gisements de sulfates, est parmi l'un des plus stables. On le trouve en association avec tous les autres sulfates mais aussi en surface où il donne la couleur vert-jaune caractéristique des zones d'altération sulfatées. Les copiapites de Saghand se présentent soit en écailles de plusieurs centimètres de long, soit en cristaux présentant de belles faces, ou encore en masses verdâtres ; elles sont alors mal cristallisées et donnent des raies de diffraction très larges. Dans ce cas elles sont toujours associées à la parabutlélite. Le domaine de stabilité des copiapites est chimiquement grand et, pour des solutions normales, s'établit avec celui de la parabutlélite ; avec des solutions plus acides l'équilibre s'établit, soit avec la coquimbite ($T > 50^\circ \text{C}$), soit avec la kornélite ($T < 50^\circ \text{C}$). A Saghand, nous l'avons trouvée en association avec de la parabutlélite dans la zone supérieure et avec de la coquimbite dans la zone intermédiaire.

La roémérite $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}_2^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 14 \text{H}_2\text{O}$ triclinique. Ce minéral a été trouvé à Saghand, en croûte marron violacé recouvrant la roche des zones basses. Quelques cristaux, protégés de la dissolution par de la tamarugite, ont montré des faces souvent plus ou moins dissoutes. Caractéristique de la zone inférieure, elle n'est formée qu'à partir de solutions contenant un excès d'acide sulfurique. Quand la solution tend à se neutraliser, c'est le premier minéral à se remettre en solution. Elle s'altère généralement en coquimbite. Il faut signaler que ce minéral a montré un

degré d'oxydation à l'autre.

La voltaïte minéral se noires et en beaux cristaux {100} avec en association avec la roémérite dans la zone inférieure et de cristaux vifs formes {100} minéral qui d'acide sulfurique apportent solution de Mg , Fe^{2+} ou avec de l'hydrogène de la solution jamais été ou de roémérite alors que ce minéral n'est pas rencontré dans la mine de

La fibroïte A Saghand mais le faciès de ce minéral ferrite. Ce minéral résiste il est aussi en parties partielles, qu'il n'a pas pseudomorphosé.

La hohmannite Ce minéral nous l'avons trouvé provenant plus, il est en métahydrogène par les échantillons. Le passage par l'étude a pu être l'amarantite très rare et ne permet pas de paragenèse de second

L'amarantite se présente en orange (au) mais forme

degré d'oxydation (2,66) constant d'un gisement à l'autre.

La voltaïte $K_2F_5^{2+}Fe_4^{3+}(SO_4)_{12} \cdot 18H_2O$ cubique. Ce minéral se présente en masses microcristallines noires et en poudre verte au fond de la mine. De très beaux cristaux présentant les combinaisons de {100} avec {110} ou avec {111} ont été observées en association avec de la roémérite et de la coquimbite dans le bas de la mine ; ces cristaux peuvent atteindre 5 mm d'arête. D'un échantillon de coquimbite et d'anhydrite nous avons pu extraire des cristaux vert clair présentant les associations de formes {100}, {110} et {302}. C'est encore un minéral qui ne peut se former qu'avec un excès d'acide sulfurique et les travaux de synthèse nous apportent de précieux renseignements. Lorsque la solution mère contient des éléments tels que K, Mg, Fe^{2+} ou Al, il cristallise toujours en association avec de l'halotrichite ; plus tard, après vieillissement de la solution, il se forme de la coquimbite. Il n'a jamais été signalé de cristallisation de szomolnokite ou de roémérite au cours d'expérience de synthèse, alors que ces deux minéraux sont les plus fréquemment rencontrés en association avec la voltaïte dans la mine de Saghand.

La fibroferrite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 5H_2O$ rhomboédrique. A Saghand, nous n'avons pas trouvé de fibroferrite, mais le faciès fibreux de la butlélite fait penser que ce minéral provient de la déshydratation de la fibroferrite. Caractéristique de climats tempérés, ce minéral résiste mal à une élévation de température ; il est aussi sensible aux variations de pressions partielles de vapeur d'eau. C'est pour cette raison qu'il n'a pas été rencontré à Saghand que pseudo-morphosé en butlélite.

La hohmannite $Fe_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 7H_2O$ triclinique. Ce minéral est beaucoup plus rare que l'amarantite ; nous l'avons étudié sous forme microcristalline et provenant d'une hydratation de l'amarantite. De plus, il est souvent lui-même altéré superficiellement en métahohmannite. Ces observations sont confirmées par les analyses thermiques. La déshydratation commence à 50° avec un pic endothermique à 162°. Le passage par un sous-hydrate à 4 H_2O est confirmé par l'étude thermogravimétrique. La hohmannite a pu être obtenue par déshydratation partielle de l'amarantite suivie d'une réhydratation. Ce minéral très rare est mal connu et le peu de produit trouvé ne permet pas de placer la hohmannite dans la paragenèse, mais elle semble appartenir aux sulfates de « seconde génération » formés après les autres.

L'amarantite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 3H_2O$ triclinique. Elle se présente en petits cristaux de couleur rouge orangé (amarante) de quelques millimètres de long, mais formant des masses de plusieurs kilogrammes,

ce qui est tout à fait exceptionnel ; elle est à l'origine de la découverte du gisement. Ce minéral a été trouvé exclusivement dans la zone supérieure et il est toujours associé à de la parabutlélite et de la copiapite ; les solutions étaient donc moins acides à ce niveau.

La butlélite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 2H_2O$ monoclinique. Ce minéral a été trouvé sous forme microcristalline et semble provenir de la déshydratation de la fibroferrite. Des cristaux ont aussi été observés parmi les croûtes cristallines de parabutlélite, mais la distinction entre les deux minéraux n'est pas aisée même avec l'aide des RX. A Saghand, il faut considérer deux types de butlélite : la butlélite microcristalline provenant de la déshydratation de la fibroferrite, et qui appartient aux sulfates dits de « seconde génération », et la butlélite formée directement à partir de la solution et que l'on trouve en association avec de la parabutlélite.

La parabutlélite $Fe(SO_4)(OH) \cdot 2H_2O$ orthorhombique. La parabutlélite se présente généralement sous la forme de croûtes cristallines brun orangé où certains minéraux peuvent atteindre le centimètre. Les cristaux présentent le plus fréquemment les faces {212} et {011} bien développées. Des cristaux plus petits et bipyramidés ont pu être extraits du gypse ou de l'alunogène. La parabutlélite est un polymorphe orthorhombique de la butlélite. La taille et la qualité de la parabutlélite trouvée à Saghand sont tout à fait exceptionnelles pour un minéral qui en fait, est assez rare. Il a cristallisé sur une roche fortement limonitisée trouvée près du chapeau de fer.

La métahohmannite $Fe_2(SO_4)_2(OH)_2 \cdot 3H_2O$. Sur un échantillon de hohmannite poudreuse nous avons pu observer une altération superficielle de couleur plus rouge. Il nous a été impossible de séparer les deux produits mais le diagramme de poudre indique un mélange hohmannite-métahohmannite.

La coquimbite $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ hexagonale. Elle se présente, sous différents faciès, tapissant les parois de la zone basse : — en poudre blanche, que l'on peut facilement confondre avec de la szomolnokite ; — en masses violacées microcristallines associées à de l'anhydrite et de la voltaïte verte ; — en cristaux transparents, de couleur violette, montrant généralement une face {00.1} bien développée ; — en petits individus incolores, bipyramidés, sur lesquels nous avons pu faire une étude au goniomètre de Buerger.

Associé à la roémérite et à la voltaïte, elle est caractéristique des niveaux où les sulfates ne sont pas encore entièrement oxydés. Les synthèses ont montré qu'elle se situait du côté acide par rapport à la copiapite, pour les températures supérieures à 50°, mais à des températures inférieures il y a

formation de kornélite $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 7 \text{H}_2\text{O}$, ce que nous n'avons jamais observé dans les gisements. C'est un minéral caractéristique du niveau intermédiaire où les sulfates de fer ne sont pas tous oxydés. La paracoquimbite (phase rhomboédrique) et la quenstedtite (hydrate supérieur) sont absentes à Saghand.

La métavolline $(\text{Na}, \text{K})_5\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_6(\text{OH})_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ hexagonale. La métavolline a été découverte en Iran (Madan-e-Zakh, Siah Kuh) par Blass en 1883. Ce minéral se présente à Saghand sous la forme de petites tablettes hexagonales, pouvant atteindre 1 mm mais dont l'épaisseur ne dépasse jamais 10μ ; il a cependant été possible d'observer les formes les plus classiques $\{00.1\}$, $\{10.1\}$ et $\{10.0\}$. Nous l'avons placée relativement tôt dans les séquences paragenétiques. Ce minéral n'est jamais associé aux minéraux ferriques de la zone supérieure. On le trouve aussi bien en plaquettes incluses dans des cristaux de coquimbite qu'en cristallisations le recouvrant. C'est le premier à exprimer le sodium dans les gisements iraniens où la sidéronatrite et la ferrinatrite n'ont jamais été rencontrées. Ce minéral n'est pas caractéristique des zones arides puisqu'on le trouve en région humide; il est beaucoup plus sensible à des variations de température qu'à la concentration des solutions.

Les jarosites $(\text{Na}, \text{K})\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ hexagonales. Nous avons trouvé ces minéraux en Iran sous différents faciès: en poudre orangée mélangée à de la limonite ou en croûte cristalline, plus rarement en poudre verte accompagnant l'amarantite. De très beaux rhomboèdres ont été trouvés dans l'halotrichite et le gypse. Nous avons pu observer un faciès en écailles et un autre en rhomboèdre non aplatis dans de la hohmannite. Ce minéral est le plus stable des sulfates ferriques. Il n'est pas hydrolysé par les eaux météoriques et reste dans le chapeau de fer, associé à de la limonite. Il peut apporter des renseignements sur les solutions sulfatées formées au niveau du minerai primaire, avant que des travaux importants soient entrepris.

Sulfates d'aluminium.

Série halotrichite-pickeringite $(\text{Fe}^{++}, \text{Mg})\text{Al}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 22\text{H}_2\text{O}$ monoclinique. Ce sont des sulfates d'aluminium très communs des zones d'altération sulfatée. Il existe une série continue du pôle ferreux au pôle magnésien.

Nous les avons toujours trouvés en quantités importantes: — en fibre de plusieurs décimètres de long à Baïdjan (Damavend); — en aiguilles translucides de quelques millimètres; — en poudre blanche; — en masse verdâtre à cassure conchoïdale. Sur aucun échantillon, nous n'avons pu trouver de cristaux avec une terminaison.

Mém. h. sér. Soc. géol. Fr., 1977, n° 8.

Les analyses ont montré un minéral plus ferreux près des sulfures avec $\text{MgO} = 1,20 \%$ ($\text{Fe}_{0,8}\text{Mg}_{0,2}$), alors que dans la zone supérieure nous avons $\text{MgO} = 2,20 \%$ ($\text{Fe}_{0,6}\text{Mg}_{0,4}$). Ce minéral est très répandu dans toutes les mines où il forme des efflorescences blanches sur les parements. Il cristallise rapidement par évaporation de solutions acides à partir de 30° ; très soluble, il est rapidement remobilisé, comme le montre sa présence dans les moindres fissures de la roche.

La tamarugite $\text{NaAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ monoclinique. La tamarugite trouvée dans la partie basse de la mine de Saghand recouvre tous les autres sulfates d'une pellicule que l'on peut aisément confondre avec du gypse. Très soluble, elle ne présente que rarement des faces; cependant, quelques cristaux ont pu être isolés et présentent alors les formes classiques.

La khadémite $\text{Al}(\text{SO}_4)(\text{OH}) \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ orthorhombique. Ce nouveau minéral a été nommé, en l'honneur de N. Khadem, directeur du Service géologique d'Iran. La khadémite se présente sous la forme de cristaux incolores, orthorhombiques, et n'offrant pas de direction d'allongement particulière; les faces $\{101\}$ et $\{001\}$ sont les plus développées, tandis que la face $\{313\}$ est rare. Ce minéral est difficile à placer par rapport aux autres sulfates d'aluminium. On peut le situer à la fin de la succession paragenétique; il a été trouvé dans la partie supérieure de la mine en association avec de la copiapite et de la parabutlélite.

L'alunogène $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ triclinique. Ce minéral est assez commun dans les chapeaux de fer des gisements pyriteux des zones arides où il se présente en masses clivables laiteuses, montrant généralement un début de déshydratation. L'alunogène qui provient de l'attaque de l'acide sulfurique sur les roches encaissantes, est caractéristique des chapeaux de fer des zones d'altération de la pyrite. Nous l'avons trouvé dans la zone supérieure de la mine mais jamais en association avec de l'halotrichite. Dans la partie supérieure, il remplace ce dernier minéral dans les fissures et les anfractuosités de la roche.

Sulfates de calcium.

Le gypse et l'anhydrite. Ces minéraux sont les seuls à exprimer le calcium dans le gisement. Ils ont été trouvés en quantité si faible qu'ils n'ont aucune signification géochimique.

CONCLUSION.

La mine de Saghand a fourni une des plus belles paragenèses de sulfates de fer. Les conditions climatiques ont conduit à la formation de paragenèses comparables à celles observées au Chili alors que l'absence de cuivre, dont la présence accélère

l'oxydation la zone inférieure observée à ces variations de concentrations. Ces solutions sont très acides à cause des sulfures, plus la concentration en CO_2 de la zone inférieure se retrouve

BARIAND P.
l'Iran
BARIAND P.,
(1977)
la France
Par
BIODER H.
Uni
BLASS J. (J)
was
Akç
CESBRON F.

l'oxydation des ions Fe^{2+} en ions Fe^{3+} , conduit dans la zone inférieure à une paragenèse semblable à celle observée à San Raphaël Swell (U.S.A.). Les minéralisations que nous avons décrites illustrent les variations de concentration des solutions sulfatées. Ces solutions provenant de l'altération de la pyrite sont très acides, et plus on s'éloigne des zones des sulfures, plus les solutions se neutralisent (baisse de la concentration par dépôt des premiers sulfates, CO_2 de la gangue ou atmosphérique, dilution par de rares précipitations). Cette évolution de la solution se retrouve au niveau des minéralisations sulfatées.

Il est difficile de mesurer le Eh et le pH dans de telles conditions, et pour cette raison, nous avons substitué à de telles mesures l'observation des paragenèses. Si tous les sulfates cités ne sont pas d'une détermination aisée, certains de ces minéraux sont facilement identifiables à l'œil nu sans risque d'erreur : la voltaïte est toujours noire, la coquimbite améthyste, et les minéraux de la famille $Fe(SO)_4(OH)xH_2O$ de couleur orangée. Chacun correspond à une zone observée dans la mine et peut, en première approximation, apporter des renseignements quant à la proximité des sulfures.

Bibliographie

- BARIAND P. (1963). — Contribution à la minéralogie de l'Iran. *Bull. Soc. fr. Min. Cristallogr.*, 86, p. 18-64.
- BARIAND P., BERTHELON J. P., CESBRON F. et SADRZADEH M. (1973). — Un nouveau sulfate hydraté d'aluminium : la khadémite de Saghand (Iran). *C. R. Acad. Sc.*, Paris, vol. 277, p. 585-1589.
- BIODER H. (1964). — Carpets from Eastern Turkestan. Universe Books, New York, p. 46-47.
- BLASS J. (1883). — Beiträge zur Kenntniss natürlicher wasserhaltiger Doppel-sulfate. *Zungsberichte der Akademie der Wissen chaffen*, vol. 87, 491, 141-163.
- CESBRON F. (1964). — Contribution à la minéralogie des sulfates de fer hydratés. *Bull. Soc. fr. Mineral. Cristallogr.*, vol. 87, p. 125-143.
- CESBRON F. et SADRZADEH M. (1973). — Nouvelles données sur l'alunogène. *Bull. Soc. fr. Min. Cristallogr.*, vol. 96, p. 385-387.
- HAGHIPOUR A., PELISSIER G. et BOULOURCHI M. H. (1970). — Geological Map of Ardekan (1/250 000). Geological Survey of Iran.
- RUEDIN E. G. (1971). — Connaissance du tapis. Office du livre, Fribourg (Suisse).
- SADRZADEH M. (1973). — Les sulfates associés aux gîtes métallifères dans les zones arides de l'Iran (Thèse de Doctorat d'État, Paris).