

## Minéralisation et altération hydrothermale du gisement de Salau

par

P. SOLER \*

avec la collaboration de M. FONTEILLES \*\*

### 4.1. Minéralisation développée dans les roches calciques

La plus grande partie de la minéralisation en scheelite est développée dans les skarns et skarnoïdes, à l'exclusion de tout autre roche calcique, dans une gangue de paragenèse très variée mais où la pyrrhotite est toujours abondante. On observe à l'affleurement l'envahissement des skarns et skarnoïdes par la pyrrhotite xénomorphe, finement cristallisée. Cet envahissement peut être total, l'identification de la roche d'origine est alors rendue difficile surtout lorsque la minéralisation se développe au contact de la granodiorite. Elle peut, dans ce cas, recouvrir le contact originel et se développer à la fois dans l'encaissant et dans l'intrusion. C'est le cas, en particulier, en « formation nord ». Il n'est pas rare que des lambeaux de skarns ou de skarnoïdes, à hédenbergite, grenat et épidote subsistent au sein du minerai à pyrrhotite massive. La géométrie de la minéralisation exploitable n'est donc pas superposable à celle des roches d'origine métasomatique. On a un emboîtement successif : [cornéennes calciques et marbres > skarns et skarnoïdes > minéralisation], correspondant à des phénomènes de plus en plus localisés. La minéralisation exploitable se développe également dans des zones broyées et dans des failles au sein de l'intrusion (mais tout de même près du contact) ou au contact. Ceci est particulièrement net au

bord sud de la « formation sud » et dans le quartier Véronique. Quelques analyses chimiques du minerai sont données au tableau 10. Elles montrent une grande hétérogénéité que va souligner l'étude des associations minérales.

Parmi les phénomènes hydrothermaux, le développement de *mispickel* semble, d'après les relations texturales, le plus précoce. Ce minéral présente un développement sporadique avec une localisation tout à fait indépendante de celle des concentrations de pyrrhotite et des hautes teneurs en tungstène. L'électrum a quelquefois pu être observé associé au *mispickel*.

La *scheelite* formée à ce stade a une répartition extrêmement irrégulière traduisant une teneur moyenne de 1 à 2 %  $WO_3$  dans le minerai et atteignant jusqu'à 15 % dans certains blocs. La variation peut se faire sur quelques centimètres seulement. La *scheelite* est très peu molybdique.

La *pyrrhotite* cristallise dès la fin des phénomènes métasomatiques et continue, d'après les relations texturales, à se former après la fin du dépôt de la *scheelite*. Sa composition a été déterminée par la position de la raie (102) en diffractométrie X, méthode valable uniquement pour une *pyrrhotite* hexagonale 1C (M. ARNOLD, 1966;

\* Ecole Nationale Supérieure des Mines, Paris.

\*\* C.N.R.S., Université de Marseille, Centre de Saint-Jérôme, Laboratoire de géologie structurale.

P. TOULMIN et P.B. BARTON, 1964; R.A. YUND et H.T. HALL, 1969). Les résultats très cohérents donnent une composition  $Fe_{0,914}S$  qui est la même dans tout le gisement et ne dépend donc pas en particulier de la présence ou non de scheelite. La pyrrhotite est en général accompagnée de *chalcopyrite* irrégulièrement répartie (la teneur moyenne du minerai est 0,20 % Cu) et de sphalérite toujours en très faible quantité. Elle contient assez fréquemment de petites inclusions de *galène* et de *bismuth natif*, le plus souvent associés, qu'accompagnent exceptionnellement *tétradymite* et *bismuthinite*.

La pyrite est parfois présente. Elle est tardive par rapport à la pyrrhotite. La présence de magnétite et de molybdénite a été signalée de façon exceptionnelle, sans qu'il soit possible de préciser leurs relations avec la pyrrhotite.

La *gangue* de ce minerai riche en scheelite est le produit de l'altération hydrothermale des skarns et skarnoïdes. La pyrrhotite contient des reliques d'hédenbergite, aux dépens de laquelle se développe une amphibole de composition variant entre une ferro-trémolite (analyse 8, tableau 5) et une hornblende très riche en fer (FeO total = 32 %; M. FONTEILLES et G. MACHAIRAS, 1968). Les minéraux associés sont le quartz, la calcite et l'épidote. Le clinocllore, le stilpnomélane et le microcline s'y associent plus rarement.

## 4.2. Evolution des roches quartzo-feldspathiques

Le minerai à pyrrhotite-scheelite se développe en partie aux dépens de la granodiorite *s.l.* Macroscopiquement il présente le même aspect et la même paragenèse que le minerai développé aux dépens des skarns *s.l.*, mais les minéraux de gangue sont différents. On y trouve en effet de façon systématique quartz et calcite accompagnés le plus souvent d'albite et, selon le cas, de biotite magnésienne brun jaune pâle en lame mince, pauvre en titane (analyse 1 et 2, tableau 11), de chlorite (analyse 3), d'épidote (analyses 4 et 5), de muscovite et d'apatite. On y trouve de manière exceptionnelle une tourmaline fibreuse jaune paille à incolore en lame mince.

L'abondance relative de ces minéraux est extrêmement variable; on observe des amas quasi monominéraux d'albite, d'apatite et en particulier de biotite parfois au sein d'une même lame mince. Ceci est dû à l'action de divers phénomènes métasomatiques qui affectent également la granodiorite non minéralisée en scheelite.

TABLEAU 10. — Analyses chimiques du minerai.

N° Echantillon	1 513	2 514	3 522
SiO <sub>2</sub>	20,04	31,74	16,58
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,77	22,24	3,21
Fe	39,02	8,72	38,74
FeO	(50,20)	(11,22)	(49,84)
MnO	0,05	0,09	0,04
MgO	1,64	tr.	0,73
CaO	2,70	15,28	3,40
Na <sub>2</sub> O	0,25	0,94	0,07
K <sub>2</sub> O	1,48	1,52	0,53
TiO <sub>2</sub>	0,34	0,23	0,20
H <sub>2</sub> O	1,38	2,08	1,02
CO <sub>2</sub>	0,10	n.d.	0,61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11	0,17	0,34
S	23,33	6,00	24,69
WO <sub>3</sub>	2,23	6,36	7,19
Cu	tr.	1,23	0,71
TOTAL	98,44	96,60	98,04

Les bordures du massif granodioritique ont subi une évolution parallèle à celle des roches calciques, avec différents stades superposés.

Le phénomène le plus général est une séricitisation et une saussuritisation du plagioclase. L'allanite forme souvent le cœur de l'épidote ainsi développée. La chloritisation de la biotite avec libération du titane sous forme d'ilménite et/ou de rutile, est également très fréquente. Ces modifications ont un caractère isochimique, excepté en ce qui concerne la teneur en eau et sont les plus précoces.

A un stade un peu plus tardif se développent des paragenèses toujours très localisées (en veines notamment, voir plus loin) du type greisen avec silicification, développement de muscovite en grandes lames aux dépens du plagioclase et de tourmaline fibreuse, jaune paille à incolore en lame mince, pouvant localement donner des veinules de tourmaline massive. Le mispickel est constam-

TABLEAU 11. — Minéraux des roches d'origine hydrothermale.

N° Minéral	1 Biotite	2 Biotite	3 Chlorite	4 Epidote	5 Epidote
SiO <sub>2</sub>	36,90	33,76	26,34	37,70	36,94
TiO <sub>2</sub>	1,58	1,57	0,11	0,02	0,02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16,76	18,53	18,40	29,70	30,80
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,00	0,00	9,04	6,86
FeO	20,06	21,99	33,93	0,00	0,00
MnO	0,24	0,28	0,06	0,05	0,06
MgO	11,12	9,18	7,74	0,02	0,02
CaO	0,00	0,00	0,00	23,15	22,95
Na <sub>2</sub> O	0,10	0,10	0,03	0,01	0,01
K <sub>2</sub> O	10,58	10,51	0,00	0,00	0,00
H <sub>2</sub> O	3,91	3,81	10,62	1,95	1,93
TOTAL	101,25	99,74	97,83	101,64	99,59
Si	5,65	5,30	5,95	2,89	2,87
Al <sup>IV</sup>	2,35	2,70	2,05	0,11	0,13
Ti	0,18	0,19	0,02	0,00	0,00
Al <sup>VI</sup>	0,67	0,73	2,84	2,57	2,68
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,00	0,00	0,52	0,40
Fe <sup>2+</sup>	2,56	2,88	6,39	0,00	0,00
Mn	0,03	0,04	0,13	0,00	0,00
Mg	2,55	2,16	2,62	0,00	0,00
Ca	0,00	0,00	0,00	1,90	1,91
Na	0,03	0,03	0,01	0,00	0,00
K	2,07	2,11	0,00	0,00	0,00
OH	4,00	4,00	16,00	1,00	1,00

ment associé à cette paragenèse avec, de manière exceptionnelle, la wolframite en reliques dans la scheelite; cette paragenèse est donc précoce par rapport au stade principal de minéralisation. Elle se rencontre le long de zones faillées.

A un stade plus tardif, correspondant à l'épisode principal de dépôt de la minéralisation, on observe des paragenèses voisines de celles de la gangue du minerai lui-même. Ce sont des phénomènes d'albitisation, de potassification et d'apport de chaux, sans qu'il soit possible, dans l'état actuel de l'étude, de dire s'il s'agit des transformations issues d'un même épisode ou d'épisodes superposés. Dans de nombreux cas, du moins, les effets sont bien séparés et l'on observe, tout comme dans le minerai, des « amas » monominéraux très localisés.

L'albitisation est parfois totale. La roche est constituée à 80 % environ d'albite (Na<sub>2</sub>O = 8,49 %, analyse 12, tableau 1) qui remplace le plagioclase, le quartz et, comme le montre la présence d'albite

« en échiquier », le feldspath potassique. Le seul minéral apparemment en équilibre avec l'albite, au stade d'albitisation le plus intense, est la calcite. Ces « albitites » sont fréquemment recoupées par des veinules de quartz d'une part et d'épidote et/ou calcite d'autre part.

La potassification se traduit le plus souvent par la néoformation d'une biotite magnésienne, brun jaune pâle en lame mince, moins titanifère que la biotite magmatique (analyse 3, tableau 12). Cette biotite se développe aux dépens de la chlorite, (elle-même développée sur la biotite magmatique). La biotite développée aux dépens de l'autre chlorite (développée sur l'almandin des roches de bordure contaminées) est plus ferrifère et plus titanifère (analyse 4, tableau 12).

Accessoirement, cette potassification se traduit par la formation de microcline, en petits cristaux limpides, toujours peu abondant et associé à la biotite dans des veinules et des cavités miarolitiques.

TABLEAU 12. — Minéraux d'altération des roches intrusives du gisement de Salau.

N°	1	2	3	4	5	6	7
Minéral	Chlorite	Chlorite granite altéré	Biotite	Biotite granite altéré	Epidote	Epidote	Amphibole
SiO <sub>2</sub>	24,68	23,87	37,35	33,63	39,34	38,14	50,93
TiO <sub>2</sub>	0,05	0,05	0,00	0,38	1,18	0,00	0,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19,22	20,86	16,18	17,97	30,80	28,58	5,24
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,00	0,67	0,00	0,00	3,66	3,07	2,34
FeO	23,61	30,92	17,49	26,91	1,25	0,61	23,36
MnO	0,61	0,51	0,47	0,39	0,12	0,11	0,87
MgO	14,21	10,76	11,66	5,54	0,00	0,01	5,79
CaO	0,03	0,03	0,16	0,00	23,67	23,00	11,10
Na <sub>2</sub> O	0,00	0,05	0,16	0,00	0,01	0,01	0,57
K <sub>2</sub> O	0,03	0,00	9,02	9,75	0,00	0,00	0,37
H <sub>2</sub> O	10,65	10,96	3,82	3,71	2,02	1,99	2,02
TOTAL	93,06	98,63	96,69	99,14	100,86	100,55	102,79
Si	5,56	5,25	5,87	5,43	3,00	2,96	7,53
Al <sup>IV</sup>	2,44	2,75	2,13	2,57	0,00	0,04	0,47
Ti	0,01	0,00	0,04	0,14	0,00	0,00	0,02
Al <sup>VI</sup>	2,65	2,52	0,86	0,84	2,77	2,57	0,44
Fe <sup>3+</sup>	0,00	0,11	0,00	0,00	0,21	0,47	0,26
Fe <sup>2+</sup>	4,43	5,64	2,29	3,62	0,08	0,04	2,88
Mn	0,12	0,09	0,06	0,05	0,01	0,01	0,11
Mg	4,80	3,53	2,75	1,34	0,00	0,00	1,28
Ca	0,01	0,01	0,03	0,00	1,94	1,91	1,76
Na	0,00	0,02	0,05	0,02	0,00	0,00	0,16
K	0,00	0,00	1,81	2,01	0,00	0,00	0,07
OH	16,00	16,00	4,00	4,00	1,00	1,00	2,00

L'analyse chimique globale des roches potassifiées montre que le phénomène est appréciable. Par exemple, (analyse 2, tableau 1) la teneur en K<sub>2</sub>O peut passer de 2,80 % pour une quartz-diorite banale à 4,50 % quand elle est potassifiée.

L'apport de chaux se manifeste principalement par le développement d'épidote (analyses 5 et 6, tableau 12), soit le plus souvent aux dépens du plagioclase, soit aux dépens de la biotite primaire. Dans ce cas, le fantôme de la biotite est matérialisé

par des baguettes de rutile (sagénite) respectant la géométrie des lamelles de biotite. L'épidote se développe également aux dépens de la biotite néoformée et en veinules où elle est associée à calcite et amphibole (analyse 7, tableau 12).

L'apport de chaux s'est donc très vraisemblablement produit en plusieurs épisodes. Il se manifeste d'ailleurs à des stades tout à fait tardifs (voir 4.4.).

### 4.3. Minéralisation dans les zones broyées

La minéralisation se développe, de manière accessoire, dans des zones broyées (voir 2.2.2.). On peut y distinguer deux paragenèses :

— dans la partie la plus profonde du gisement du Bois d'Anglade sur la grande faille E-W limitant la « formation sud », l'association est: quartz, pyrrhotite, chalcopryrite, blende, mispickel, scheelite. Au

cœur de la scheelite on observe parfois des reliques de wolframite. Ce type de minéralisation où le quartz est généralement largement dominant, est particulièrement associé aux zones de greisenisation des roches intrusives. Il est très probable que cette paragenèse soit précoce par rapport au stade principal de minéralisation.

— dans l'ensemble des zones broyées, y compris sur la grande faille E-W, on trouve une association à quartz, pyrrhotite, blende pyrite (secondaire par rapport à la pyrrhotite), scheelite, avec parfois épidote et chlorite, les sulfures pouvant localement être peu abondants. Cette paragenèse est tardive par rapport au stade principal de minéralisation.

Les structures ainsi minéralisées limitent les principaux corps de minerai.

Soulignons que la composition de la pyrrhotite est la même ( $\text{Fe}_{0,914}\text{S}$ ) à tous les stades. Ce fait est particulièrement important pour l'interprétation thermochimique (voir plus loin).

#### 4.4. Manifestations hydrothermales tardives sans scheelite

Les roches précédemment décrites sont fréquemment recoupées par des veinules à association minérale variée, mais toujours sans scheelite. Elles sont indépendantes de la minéralisation qu'elles n'affectent pas. On distingue :

— veines à chlorite - calcite - apophyllite - blende. Cette association se rencontre en remplissage tardif de faille ou en veinules dans les roches intrusives et les métashales. La chlorite verte pulvérulente est du clinocllore (détermination par diffraction X); elle englobe des cristaux automorphes d'apophyllite  $[\text{Ca},\text{K}[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{F},\text{OH})\cdot 8\text{H}_2\text{O}]$  et des rhomboèdres de calcite. La blende est localement présente.

— veines centimétriques à décimétriques d'am-

phibole fibreuse à texture d'amiante et calcite, dans les roches calciques;

— nombreuses petites veinules à épidote et/ou calcite;

— veines tardives de pyrrhotite en gros cristaux recoupant le minerai;

— veinules à quartz et chalcopryrite également traversant le minerai;

— fractures tout à fait tardives à prehnite et laumontite et veines ou géodes à quartz et/ou calcite.

Ces manifestations hydrothermales tardives clôturent l'évolution des roches constituant le gisement de Salau et son encaissant.

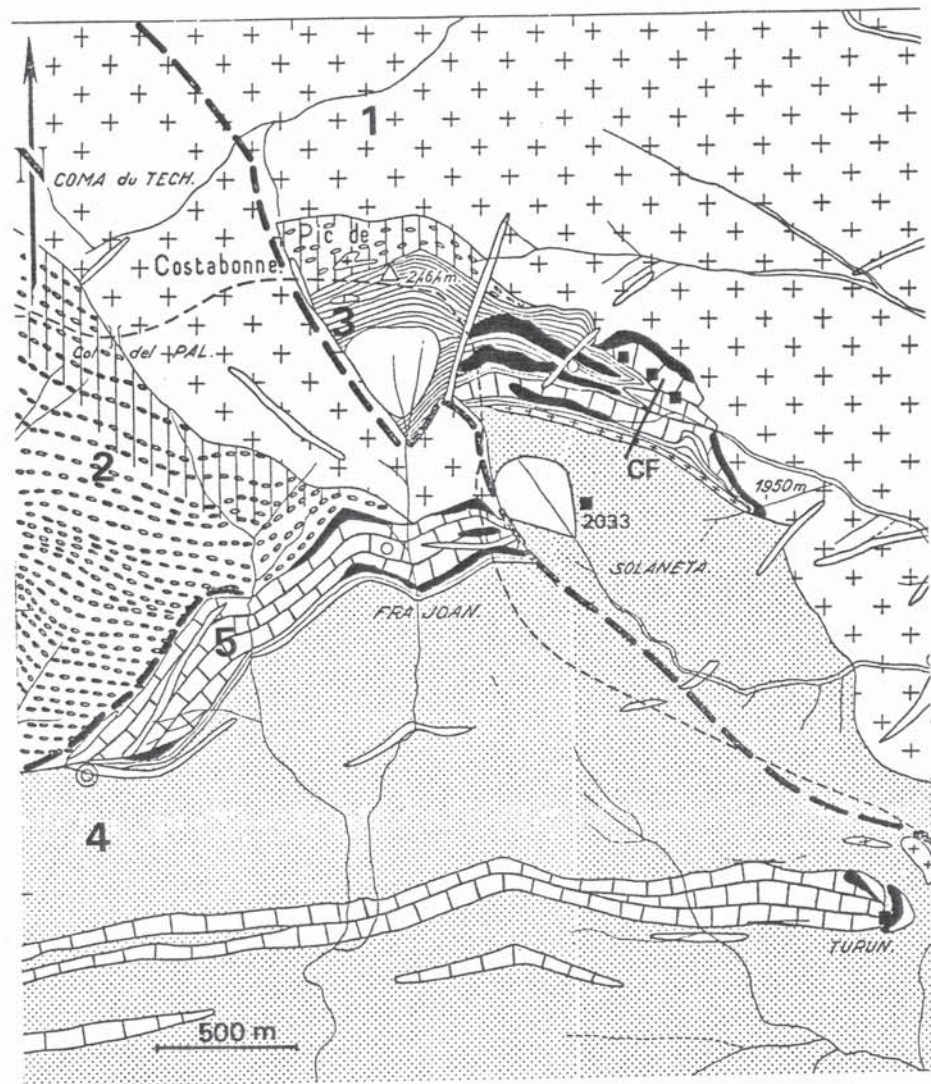


Fig. 19. — Carte géologique du contact sud du granite de Costabonne (G. GUITARD et P. LAFFITTE, 1960).  
 1. granite; 2. gneiss cœillés; 3. cornéennes calco-alumineuses; 4. micaschistes; 5. calcaires métamorphiques.  
 Les skarns sont en noir. Les carrés noirs indiquent l'entrée des galeries. Le niveau du chemin de fer (CF),  
 indiqué par le trait noir, conduit à la galerie 2185.