

Chapitre 10

Comparaison des conditions de formation des skarns à Salau et Costabonne

par

B. GUY*

10.1. Introduction

Une des différences essentielles entre Salau et Costabonne, d'après ce qui précède, concerne la minéralogie des skarns : abondance d'hédenbergite à Salau où le grenat est quasi absent, prédominance du grenat à Costabonne formant la masse des skarns. Dans la phase de rétro-morphose la différence tient aux sulfures : pyrrhotite très abondante à Salau, pyrite en très faible quantité à Costabonne.

Les raisons expliquant ces différences peuvent tenir : aux fluides, aux conditions physiques, aux encaissants.

Les données isotopiques indiquant une identité de source peuvent laisser penser que les fluides sont les mêmes dans la phase de rétro-morphose et, à fortiori, on peut supposer qu'il en est de même lors de la phase primaire.

Nous n'avons pas de raison d'imaginer des différences essentielles de conditions physiques, d'après les indications thermochimiques qui précèdent. Il s'agit dans les deux cas de l'auréole de contact pour des granites de la même famille (A. AUTRAN *et al.*, 1970) au même niveau structural de la chaîne hercynienne.

Par contre, les encaissants sont différents (calcaires graphiteux à Salau, dolomies et marbres dépourvues généralement de graphite à Costabonne). Le domaine de stabilité de l'hédenbergite est à f_{O_2} plus basse que celui du grenat et l'on peut penser que le rôle réducteur du graphite explique la formation d'hédenbergite par rapport au grenat (M. FONTEILLES *et al.*, 1978).

10.2. Granites

Avant d'aborder l'origine des différences dans la composition des skarns, il nous semble utile de discuter des éléments qui nous permettent d'affirmer l'identité des granites.

En effet, les deux granites immédiatement adjacents aux skarns sont différents : tous deux sont calco-alcalins mais celui de Salau a plus de fer,

à magnésium égal, et nettement moins de potasse que celui de Costabonne (P. SOLER, 1977).

Mais sous l'apex de Salau, on connaît un granite porphyroïde plus riche en feldspath potassique, semblable du point de vue composition à celui de Costabonne; il pourrait représenter la lignée tardive à laquelle sont liés les fluides. Remarquons

* Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Etienne.

d'ailleurs que les fluides ne viennent pas du granite directement adjacent : ils viennent des zones plus profondes et cheminent le long de contacts, parfois à quelque distance du granite, comme c'est le cas

à Costabonne. L'hypothèse de l'identité des fluides paraît donc aussi conciliable avec les types de granites présents dans les deux gîtes.

10.3. Différences dans le développement des skarns

On ne considère pas ici les skarnoïdes dérivant de cornéennes calciques rubanées, malgré leur importance en volume dans les deux gisements. Notre étude porte sur les skarns zonés formés aux dépens de roches pures, donc plus directement interprétables.

Pour alléger l'exposé, nous séparons les indications sur la minéralogie de celles sur la zonation.

10.3.1. Composition minéralogique

A. Grenats

Les grenats de Costabonne sont plus riches en fer que ceux de Salau. Plus précisément, à Costabonne on observe un premier grenat andraditique, un second de composition intermédiaire (50 % mole grossulaire - 50 % mole andradite), tandis que le grenat de Salau est plus proche du grossulaire (80 %) le deuxième en veines contenant 65 % de grossulaire.

B. Pyroxènes

A Salau le pyroxène est proche du pôle hédénbergite tandis qu'à Costabonne, il est du type ferrosalite.

On connaît par ailleurs du diopside à Costabonne, absent à Salau, de même que toute une série de minéraux sans équivalent à Salau, forstérite, minéraux du groupe de la humite, spinelle, phlogopite, brucite, talc, serpentine, borates.

C. Phase d'altération

La composition de la pyrrhotite de Salau, qu'elle soit précoce (entre les grains d'hédénbergite non transformée) ou tardive (dans la paragenèse de rétro-morphose), est parfaitement constante : $Fe_{0,914}S$.

A Costabonne, on connaît localement la magnétite probablement précoce par rapport aux sulfures. Parmi ceux-ci, la pyrite se trouve dans les skarns, alors que dans le granite altéré on rencontre parfois une pyrrhotite de composition $Fe_{0,915}S$, très proche de celle de Salau.

A Salau comme à Costabonne, les pyroxènes sont transformés en amphiboles. Les grenats de Costabonne ne sont pas épidotisés, contrairement à ceux de Salau.

10.3.2. Zonation des skarns

Sans reprendre en détail la zonation remarquons que les proportions relatives de zones sont tout à fait différentes à Salau et Costabonne. Dans les skarns zonés, le grenat à Salau ne forme qu'une mince zone centrale millimétrique pour des épaisseurs de pyroxène de quelques centimètres.

A Costabonne, la situation est inverse : pour quelques mètres de skarn, la zone à grenat occupe près de 80 % de la puissance. Remarquons que l'on a là un passage progressif pyroxène-grenat (grenato-pyroxénites) alors qu'à Salau le passage se fait par un front net.

10.4. Interprétation

10.4.1. Influence de l'encaissant sur f_{O_2}

Une différence essentielle entre Salau et Costabonne, comme nous l'avons dit, est la présence

de graphite dans l'encaissant de Salau, absent à Costabonne. Celui-ci peut tamponner la fugacité en oxygène par la réaction $C + O_2 \rightleftharpoons CO_2$, dans un domaine assez restreint pour les variations vraisemblables de f_{CO_2} , à un niveau beaucoup plus bas que celui du fluide incident.

Cela entraîne un fort gradient de f_{O_2} , qui par l'intermédiaire de la dissociation de l'eau ($H_2O \rightleftharpoons H_2 + 1/2 O_2$) va provoquer un fort gradient de H_2 .

Du fait de sa très forte mobilité, l'hydrogène va pouvoir diffuser et réduire le fluide vers l'amont, à l'arrivée du fluide au niveau même d'observation. (A. MIYASHIRO, 1964).

A Costabonne, la fugacité en oxygène de l'encaissant dolomitique n'est pas imposée par une condition particulière de ce type et l'on est probablement dans une situation intermédiaire donnant une variation de f_{O_2} plus progressive.

Cette différence essentielle peut expliquer dans une large mesure, comme nous allons le voir, certains traits majeurs des skarns.

On ne sait pas si l'influence réductrice de l'encaissant vient de près (influence au niveau même d'observation) ou de loin (sur tout le trajet des fluides en amont). Nous verrons plus loin comment l'on peut répondre à cette question.

10.4.2. Explication des différences de la composition des skarns

Nous allons devoir expliquer pourquoi :

- le grenat de Salau est plus alumineux que celui de Costabonne;
- la limite entre la zone à grenat et la roche à pyroxène est nette à Salau mais très floue à Costabonne;
- la zone à grenat est beaucoup plus importante de façon relative à Costabonne.

Ces différences peuvent s'expliquer par le caractère plus oxydant du fluide dans le cas de Costabonne.

- En effet, la réaction :

$And + Al_2O_3 \rightleftharpoons Gros + 2FeO + 1/2 O_2$
montre que, si Al_2O_3 et FeO sont fixés au même niveau (hypothèse de l'identité des fluides), l'augmentation de f_{O_2} conduit à la formation de grenat plus ferrifère.

- Il semble que l'on soit au voisinage de l'équilibre, au front grenat-pyroxène à Costabonne, comme le suggèrent les relations texturales des deux minéraux et l'apparition progressive du grenat en gros cristaux isolés dans la zone à salite (nucléation peu abondante) devenant de plus en plus

abondants. Si l'on écrit la réaction :

hédénbergite + O_2 + CaO \rightleftharpoons andradite + quartz, un gradient de f_{O_2} plus faible à Costabonne permet de maintenir, sur quelque distance, des conditions proches de l'équilibre. Ceci n'est pas le cas à Salau, où un gradient important de f_{O_2} est imposé.

c) Avec un même fluide incident et une roche comparable à la sortie dans les mêmes conditions, le volume total de skarn formé est approximativement proportionnel au volume du fluide ayant percolé. A ce point de vue les skarns de Salau et de Costabonne ont des épaisseurs comparables. Par contre, les zones de grenat ont des épaisseurs dans le rapport 1 à 10 ou plus. Il nous suffit donc de considérer la vitesse du front du grenat.

Cette vitesse, est d'après la théorie, (cf. chap. 7.1) proportionnelle au rapport $\Delta C_F / \Delta C_S$ dont la valeur est la même pour tous les constituants à un front donné. Nous allons envisager le cas de l'aluminium.

Estimons d'abord ΔC_F : la zone du grenat étant la première à partir de l'amont, la concentration de l'alumine avant le front est identique à celle du fluide incident donc, par hypothèse, la même à Salau qu'à Costabonne. Remarquons que la composition du grenat à Costabonne converge vers la composition de celui de Salau, loin de l'encaissant (fig. 38).

Quant à la concentration en alumine du fluide à sa sortie de la zone à grenat, on peut aussi considérer qu'elle est la même dans les deux cas, comme l'indiquent par exemple l'identité des teneurs en alumine des pyroxènes de Salau et de Costabonne, ou un raisonnement faisant intervenir les potentiels chimiques des éléments dans la zone à pyroxène. On trouve que

$$\mu Al_2O_3 = 3\mu CO_2 + \text{constante.}$$

En estimant les niveaux en CO_2 comparables dans les deux cas, les μAl_2O_3 seraient très proches.

Au total, on peut estimer que ΔC_F est en gros le même à Salau et à Costabonne.

Par contre, ΔC_S n'est pas le même. Pour l'estimer il faut alors utiliser les compositions minéralogiques des grenats. Il y a une certaine difficulté à Costabonne du fait de l'existence de plusieurs grenats. Mais on a remarqué que les grenats de Costabonne représentaient diverses compositions d'une même colonne métasomatique. En prenant alors la composition moyenne du grenat, celle-ci reste moins alumineuse à Costabonne qu'à Salau; rapporté à 6 atomes de Si on a 0,3 atome Al à Costabonne et de 3 à 4 atomes Al à Salau (atomes par formule unitaire).

Pour le rapport des vitesses on a alors :

$$\frac{V_{CB}}{V_{SA}} = \frac{(\Delta C_F^{Al}/\Delta C_S^{Al})_{CB}}{(\Delta C_F^{Al}/\Delta C_S^{Al})_{SA}}, \quad \text{ce qui avec}$$

$$(\Delta C_F^{Al})_{SA} \leq (\Delta C_F^{Al})_{CB},$$

d'après ce qui on a vu plus haut, et

$$\Delta C_S^{Al} = (C_S^{Al})_{\text{grenat}},$$

en négligeant Al dans le pyroxène, donne :

$$\frac{V_{CB}}{V_{SA}} \geq \frac{(C_S^{Al})_{SA}}{(C_S^{Al})_{CB}} \quad (\text{SA} - \text{Salau} ; \text{CB} - \text{Costabonne})$$

rapport qui est égal à 10 ou plus d'après les compositions des grenats. Ceci est bien conforme à ce que l'on observe pour les épaisseurs relatives des zones, et l'on voit que la différence observée est explicable.

10.4.3. Différences pour la phase hydrothermale

Le trajet d'évolution du fluide à Costabonne semble continu des silicates aux sulfures, par l'intermédiaire d'oxydes, tandis qu'il montre une discontinuité à Salau, où la magnétite ne précipite pas entre pyroxène et amphibole, comme cela

devrait être le cas d'après les calculs thermodynamiques.

A Costabonne, la phase hydrothermale suit le même réseau de fractures que le dernier grenat, tandis qu'à Salau il y a une discontinuité texturale nette.

Ces interruptions pourraient faire douter de l'identité possible des fluides à Salau et Costabonne au stade hydrothermal, mais il est possible qu'il en soit ainsi, comme nous le font dire un certain nombre d'arguments :

— la pyrrhotite de Costabonne, dans le granite, a une composition identique à celle de Salau. Et surtout les *données isotopiques*, tant pour le soufre que le carbone et l'oxygène, *montrent une bonne convergence* sur les deux gîtes comme on l'a vu dans le chapitre 8. Les fluides peuvent être les mêmes encore à ce stade. Les différences de paragenèse (pyrite à Costabonne, pyrrhotite à Salau) peuvent continuer de s'expliquer par des niveaux de f_{O_2} différents et, en conséquence, de f_{S_2} par l'intermédiaire de :



(H. OHMOTO, 1972). Ainsi la pyrite correspond à un domaine de f_{O_2} plus haut que celui de la pyrrhotite.

Autres différences : l'existence des minéraux magnésiens cités plus haut, (forstérite, diopside...) peut s'expliquer simplement à Costabonne par la présence de magnésium dans les dolomies, permettant à la silice de réagir encore en aval des zones ferrifères.

10.5. Conclusions

L'hypothèse de départ sur la similitude des fluides dans les deux gîtes ne semble pas mise en défaut ici de façon majeure, si l'on accepte le rôle réducteur de l'encaissant dans le cas de Salau et la présence de Mg à Costabonne pour expliquer les différences paragenétiques.

Les fluides pourraient être les mêmes à Salau et Costabonne tant dans la phase skarn que dans la phase hydrothermale.

A Costabonne, de petits skarns à hedenbergite sans grenat, où la pyrrhotite précipite lors de la phase hydrothermale comme à Salau, sont situés entre les lentilles principales des skarns nord et sud, dans des niveaux carbonatés contenant du graphite. Cette occurrence localisée confirme les conclusions précédentes et indique ainsi remarquablement l'influence immédiate de l'encaissant.

Les fluides responsables des transformations métasomatiques à Costabonne, Salau et Roc Jalère sont aussi l'agent de transport du tungstène. Or les résultats de la géochimie isotopique nous ont montré qu'ils étaient typiquement des fluides d'origine « profonde » en équilibre à l'origine avec les granitoïdes. Les recherches d'anomalies de concentration en WO_3 dans les strates sédimentaires environnant Salau et Costabonne n'ayant décelé aucune concentration prégranitique et le rôle des eaux phréatiques ou connées (*) des sédiments pou-

(*) Le terme « eaux connées » est utilisé ici pour désigner les eaux libres en équilibre avec les roches métamorphiques environnant le gîte.

vant être éliminé, il semble bien que la source du tungstène soit à rechercher au niveau de la zone profonde de formation des granitoïdes et des processus magmatiques ultérieurs d'enrichissement en fluide où le tungstène particulièrement hygromatophile se concentrera progressivement.

Dans le cas des skarns de Lacourt, par contre, la source « profonde », étrangère au milieu sédi-

mentaire, ne se fait pas sentir. Un simple recyclage de : soufre, oxygène et carbone de la série du Silurien-Dévonien inférieur, par l'intermédiaire d'eaux phréatiques ou connées mises en mouvement dans le gradient thermique périphérique du granite de Lacourt, paraît rendre compte des paragenèses et des compositions isotopiques observées. Dans ce cas d'ailleurs on constate l'absence de tungstène.