

Minéralisation et hydrothermalisme du socle du forage scientifique de Sancerre-Couy

Anne-Marie FOUILLAC ⁽¹⁾, Anne-Marie HOTTIN ⁽²⁾,
Claude LAFORÊT ⁽²⁾, Nicole SANTARELLI ⁽³⁾

Mots-clés : Minéralisation, Pyrrhotite, Susceptibilité magnétique, Isotopes stables, Soufre 34-Soufre 32, Ilménite, Rutile, Pyrite, Chalcopyrite, Donnée microsonde électronique, Altération hydrothermale, Roche métamorphique, Sondage profond, Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy), Bassin parisien

Tout au long du forage les minéralisations sont représentées par des minéraux ferrotitanés et par des sulfures. La minéralisation sulfurée se présente sous divers habitus :

- 1) Elle est disséminée dans les metabasites et dans les gneiss ;
- 2) elle occupe des fissures millimétriques, en association avec une paragenèse à épidote, actinote et calcite dans les metabasites, avec de la biotite secondaire contemporaine des cisaillements ductiles dans les gneiss. La minéralisation disséminée peut être ou non en relation avec des microfissures. Dans les deux cas, le sulfure dominant est la pyrrhotite et la susceptibilité magnétique des roches est fonction de leur teneur en pyrrhotite ;
- 3) une minéralisation sulfurée à pyrrhotite dominante accompagne également une cataclase orientée postérieure au métamorphisme principal et aux cisaillements ductiles : elle se développe dans la matrice et se disperse dans la roche plus ou moins broyée qui est en même temps hydrothermalisée ;
- 4) enfin une minéralisation dominée par la pyrite apparaît dans les fractures à remplissage de calcite, quartz, sidérite, etc., liées aux horizons bréchiques, ainsi que dans les filonnets recoupant les fissures minéralisées en pyrrhotite.

Notre propos était de caractériser les paragenèses sulfurées et les silicates associés, de retracer l'histoire hydrothermale de cette portion de socle hercynien en essayant de déterminer la part de l'hydrothermalisme à pyrrhotite dans l'augmentation de la susceptibilité magnétique des roches du forage de Couy.

(1) BRGM, SGN/Département Géochimie, Orléans.

(2) BRGM, SGN/Département Cartes et synthèses géologiques, Orléans.

(3) Université de Paris VII.

Différents types de minéralisation et paragenèses silicatées associées

Minéralisation disséminée

Dans les metabasites

Minéralisation ferro-titanée

Cette minéralisation est représentée par des associations à ilménite, rutile et sphène. L'ilménite, en plages de 200 à 400 µm appartient à la paragenèse métamorphique primaire (grenat, pyroxène et amphibole brune) ; elle est associée à du rutile qui paraît généralement se développer à ses dépens mais peut également être en inclusions dans le grenat (il aurait ici la signification de relique d'une paragenèse primaire de haute pression, notamment dans les clinopyriclasites). Le sphène se présente, soit en couronne autour de l'ilménite, soit en cristaux automorphes isolés dans les amphibolites et paraît correspondre à la déstabilisation de l'ilménite au cours d'une rétro-morphose dans le faciès amphibolite.

Cette minéralisation ferrotitanée ne paraît pas être en relation avec la minéralisation sulfurée dont il sera question par la suite.

Minéralisation sulfurée

Jusqu'à - 1 800 m, on n'observe que de rares associations pyrrhotite-pyrite-chalcopyrite en plages de quelques dixièmes de millimètre ; pyrrhotite et chalcopyrite sont parfois associées mais la plupart des microplages de pyrrhotite sont indépendantes et rares. La pyrrhotite est le plus souvent remplacée par l'association pyrite-marcasite ; au vu des figures observées, cette transformation n'est pas due à une altération

supergène mais plutôt aux variations de la température et de l'activité du soufre, probablement en liaison avec la rétro-morphose (peu importante mais développée tout le long du forage) de la paragenèse silicatée primaire (bordure d'actinote autour de la hornblende, etc.). La blende est exceptionnelle, associée à la chalcoppyrite. Très ponctuellement, on trouve de la gersdorffite (sulfo-arséniure de Fe, Ni et Co) en cristaux indépendants de quelques dizaines de μm . Tous ces sulfures se rencontrent indifféremment dans la paragenèse métamorphique primaire et dans la paragenèse rétro-morphique.

Entre $-1\ 755,35$ et $-1\ 755,50$ m, le forage recoupe une amphibolite à plagioclase dans laquelle la pyrrhotite est très abondante ($\sim 15\%$). La susceptibilité magnétique, faible jusqu'à cette cote ($\leq 160 \cdot 10^{-5}$ uSI) passe brusquement à $1\ 500 - 10^{-5}$ uSI (M. Turland *et al.*, 1988). Dans cette roche, la pyrrhotite se présente en microplages xénomorphes (Pl. III, photo 13)* auxquelles peuvent s'associer du sphène, de la chalcoppyrite et plus rarement de la pyrite ; elle est incluse dans une paragenèse silicatée de basse température (albite, chlorite, actinote, prehnite, quartz).

De $-1\ 800$ m à $-3\ 000$ m, dans les gneiss amphiboliques, les amphibolites et les clinopyriclasites, le sulfure prédominant est la pyrrhotite, généralement associée à une paragenèse tardive de basse température qui paraît en relation avec un hydrothermalisme filonien ; cette pyrrhotite peut inclure des flammèches de pentlandite ou de rares cristaux de linnéite ; les associations pyrrhotite-chalcoppyrite sont fréquentes.

Dans les gneiss

Comme dans les metabasites, la minéralisation ferro-titanée est représentée par l'association ilménite-rutile-sphène (mais en proportion plus faible que dans les metabasites). L'ilménite peut se présenter en cristaux tabulaires, et être incluse dans le grenat ; le rutile se développe aux dépens de l'ilménite (parfois sous forme de baguettes) et il est fréquemment inclus en chapelets dans le grenat (avec un caractère relique d'une paragenèse antérieure de haute pression, comme dans les metabasites) ; la minéralisation sulfurée comprend pyrrhotite (prédominante), chalcoppyrite et pyrite (souvent associée à la marcasite) ponctuellement des traces de blende et de molybdénite. Pyrrhotite et chalcoppyrite, associées ou indépendantes, sont incluses aussi bien dans le quartz, dans les feldspaths et dans les grenats ; ces sulfures sont localement associés à une paragenèse secondaire à chlorite et muscovite (Pl. III, photo 9). La pyrrhotite peut inclure des exsolutions de pentlandite ou des microcristaux de glaucodot. Le graphite, fréquemment associé au grenat dans lequel il peut être inclus, appartient ainsi à la paragenèse primaire des gneiss. Sa conservation lors de la rétro-morphose hydrothermale indique clairement la très faible f_{O_2} lors de cet épisode de sulfuration.

Dans les gneiss rubanés recoupés de $-3\ 000$ à $-3\ 500$ m, la paragenèse ferrotitanée est la même que dans les gneiss précédents : le graphite est fréquent ; il peut s'associer aux sulfures (Pl. IV, photos 16 et 17).

* Les planches couleurs citées dans cet article sont dans l'article d'A.-M. Hottin, pages 118 à 121.

La pyrrhotite, abondante, est disséminée dans la roche ; elle accompagne également les biotites secondaires remplaçant le grenat (Pl. III, photo 10 et Pl. IV, photo 15). La chalcoppyrite est fréquente, souvent associée à la pyrrhotite. La blende, rare, est souvent incluse dans la chalcoppyrite ; ou bien on observe des exsolutions de chalcoppyrite dans la blende (Pl. IV, photos 17 et 19). La pentlandite est incluse sous forme d'exsolutions flammées dans la pyrrhotite (Pl. IV, photo 18). La minéralisation sulfurée disséminée semble ici en relation avec la minéralisation filonienne qu'accompagnent les mêmes biotites secondaires.

En conclusion, il n'y a pas de différence notable (mis à part pour le graphite que l'on trouve essentiellement dans les gneiss) entre la minéralisation disséminée des metabasites et celle des gneiss. Celle-ci ne semble donc pas liée génétiquement aux roches hôtes. Il s'agit d'une sulfuration tardive des gneiss et des metabasites lors de la rétro-morphose hydrothermale qui commence dès la phase de blastomylonitisation D₂ de moyenne température dont l'âge est ≤ 380 Ma.

Minéralisation fissurale à pyrrhotite dominante

Il s'agit de fissures ouvertes dont la puissance excède rarement quelques millimètres, dans lesquelles la pyrrhotite prédomine largement sur les autres sulfures (chalcoppyrite relativement fréquente, blende rare). Lorsque ces fissures sont suffisamment denses, la susceptibilité magnétique mesurée sur carottes montre des pics significatifs (notamment à $-2\ 991,50$ et $-3\ 060,50$ m où la susceptibilité atteint respectivement $1\ 100$ et $900 - 10^{-5}$ uSI). Ce type de fissures affecte aussi bien les metabasites que les gneiss.

En ce qui concerne les metabasites, une étude pétrologique et minéralogique détaillée a été effectuée sur la clinopyriclasite recoupée à $-2\ 989,50$ m (C. Chat, 1990).

La paragenèse primaire (Qz-CPX-GT-Pl) est un assemblage stable et anhydre pour lequel les thermomètres ont donné des températures comprises entre 750 et 950 °C, caractéristiques du faciès granulite. Les pressions peuvent être évaluées à une dizaine de Kb, sans que des résultats précis aient été obtenus. Les opaques n'y sont représentés que par l'ilménite.

Cette paragenèse évolue en baisse de température en présence de fluides aqueux, avec apparition locale de pargasite aux dépens du CPX.

La paragenèse secondaire se présente en filonnets sécants.

Elle est responsable :

- du remplissage de fissures par calcite, actinote, chlorite, muscovite et sulfures ;
- de la rétro-morphose *in situ* de certains minéraux de la paragenèse primaire, principalement les plagioclases (acidification du plagioclase + zoizite), et les grenats (chloritisation).

On peut admettre pour cette paragenèse des températures de l'ordre de 300 à 400 °C et l'intervention de fluides abondants (hydrothermalisme).

Lorsque ces veinules affectent les gneiss rubanés ($-3\ 000$ à $-3\ 500$ m) les sulfures sont associés à de la

biotite secondaire analogue à celle qui remplace le grenat et la biotite primaire (Pl. III, photo 11) ; cette biotite secondaire tend elle-même à se chloritiser. La comparaison du chimisme de cette biotite II avec celui de la biotite I contemporaine du métamorphisme principal (cf. fig. 5 du chapitre Pétrologie et Minéralogie) montre pour la biotite II une grande dispersion des teneurs en Ti (qui n'atteignent jamais les valeurs élevées de la biotite I), un caractère plus ferrifère et des teneurs dispersées mais élevées pour Al^{VI} ; la biotite relique de ces gneiss, présente les mêmes caractéristiques que la biotite II.

Dans toutes ces veinules, les sulfures les plus répandus sont la pyrrhotite et la chalcopryrite (Pl. IV, photo 14). Les cristaux de pyrrhotite souvent millimétriques sont visibles à l'œil nu ; le pourcentage de chalcopryrite est variable, elle se présente en cristaux de 50 à 75 μm , la blende est toujours en traces (Pl. IV, photos 17 et 19), la pentlandite en exsolutions dans la pyrrhotite.

Minéralisation sulfurée associée aux blastomylonites syn-D3 du stade ductile cassant

Ce type de minéralisation à pyrrhotite dominante a été étudié à - 2 784,90 m, - 2 890,50 m et - 3 456,80 m.

Le premier échantillon correspond à une passée amphibolique dans une zone décrite comme une brèche « à chaud » ; cette bréchification qui se développe avec une intensité variable sur environ 10 m affecte des clinopyroxénites et des amphibolites dans lesquelles est injectée une trondhjemite pegmatitique sur 2,50 m ; les passées amphiboliques minéralisées affectent aussi bien la trondhjemite que les amphibolites. La roche étudiée correspond à un assemblage d'actinote et d'épidote ; les sulfures sont représentés par la pyrrhotite, la chalcopryrite et la blende qui apparaît ici en proportion notable ; elle se présente soit en cristaux tabulaires (150 à 300 μm), soit en agrégats (~ 150 μm) inclus dans la pyrrhotite ou la chalcopryrite (Pl. IV, photos 20 et 21).

A - 2 890,50 m, toujours dans cette zone de brèche, un gneiss à biotite et grenat est affecté par une cataclase orientée importante : des clastes de quartz, feldspaths, grenat et biotite baignent dans une matrice à biotite très finement cristallisée ; la roche est de plus affectée par de très nombreuses veinules à actinote, à laquelle peut s'associer du clinopyroxène qui constitue également des veinules indépendantes (Pl. III, photo 12).

Dans la roche, la minéralisation est essentiellement ferrotitanée : ilménite indépendante ou déstabilisée en rutile ou encore frangée de sphène, ou associations ilménite-rutile-sphène (Pl. IV, photo 22) : la pyrrhotite est présente uniquement sous forme de très rares microcristaux disséminés. Dans les veinules, la minéralisation est essentiellement sulfurée à pyrrhotite prédominante, avec exsolutions flammées de pentlandite, un peu de chalcopryrite et blende très rare ; la pyrrhotite en plages millimétriques englobe l'ilménite.

A - 3 456,80 m, sur environ 10 cm, un gneiss rubané à biotite est affecté par une blastomylonite orientée

postérieure aux cisaillements affectant ces gneiss, avec développement de cloisons biotitiques très finement cristallisées. La minéralisation ferro-titanée est représentée par de l'ilménite qui apparaît ici autour du rutile. La minéralisation sulfurée est toujours dominée par la pyrrhotite subautomorphe à laquelle peuvent s'associer chalcopryrite et blende. De rares cristaux de galène (quelques μm) sont inclus dans un cristal de pyrrhotite (Pl. IV, photo 23).

L'épisode hydrothermal montre donc un stade de percolation fissurale de température $\geq 500^\circ$ (présence de CPx) s'abaissant environ à 350° (actinote). C'est la gamme de température où se fige le système $^{39}Ar/^{40}Ar$. Cet épisode hydrothermal assez ubiquiste et post S_2 pourrait donc être précoce (Dévonien ? S. Costa et H. Maluski, 1988).

Les filons et veines à pyrite des zones bréchiques

La partie totalement carottée (jusqu'à - 1 800 m) du forage a recoupé de nombreuses zones de brèches. A ces zones de brèches, d'épaisseur métrique à centimétrique (C. Castaing *et al.*, 1988) s'associent des veines et des filons à remplissage varié (calcite, sidérite, quartz, phyllosilicates variés, zéolites) où la pyrite est le sulfure prédominant. Elle se présente sous forme d'agrégats ou en petits cristaux disséminés montrant fréquemment une croissance rythmique par nourrissage. Très ponctuellement de la magnétite néoformée a été observée dans une fissure liée à une telle zone bréchique. On peut également trouver des reliques de pyrrhotite et de chalcopryrite. Dans ces structures perméables de cataclase, la roche a subi une rétro-morphose importante (chloritisation, séricitisation, etc.) associée à des phénomènes de silicification et de carbonatation.

La paragenèse sulfurée indique une nette augmentation de fO_2 par rapport aux stades de sulfuration précédents et la présence de CO_2 dans le fluide. L'étude des fluides piégés en inclusions primaires des calcites filoniennes à - 1 005, - 1 048 et - 1 067 m (M. Pagel, ce volume) indique que ce fluide est d'origine profonde et pourrait être relié à l'hydrothermalisme associé au magmatisme alcalin d'âge stéphanien.

Étude physico-chimique des sulfures

L'augmentation de la susceptibilité magnétique des roches recoupées par le forage étant liée à l'abondance de la pyrrhotite, il a semblé intéressant de vérifier si dans les différents types de sulfures décrits précédemment, la pyrrhotite était la même ou non. On a donc étudié ses propriétés physiques (diffractométrie aux rayons X et résonance paramagnétique électronique) et sa composition chimique (analyses ponctuelles à la microsonde électronique). Une analyse de la composition isotopique du soufre a été effectuée sur des concentrés de pyrrhotite provenant de roches dans lesquelles l'habitus de la pyrrhotite correspond aux types décrits précédemment (voir plus loin).

	2784,97	2989,50	3060,50		3163,75
	Zone cataclasée	Veinules	Dans grenat	Dans fente	Disséminée
Fe	60,14	58,62	59,10	59,02	58,76
Co	0,00	0,06	0,08	0,05	0,21
Ni	0,01	0,64	0,31	0,08	0,97
Cu	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00
S	40,25	39,65	39,76	40,05	39,76
	100,69	99,01	99,25	99,12	99,70
Fe	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45
Co	0,00	-	0,00	0,00	0,00
Ni	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Cu	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
S	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54
Fe _x S X =	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85
PYRRHOTITES					

	2785	3060	2368,89		3163,75	2785	3060,50
			Glaucodot	Pentlandite			
Fe	11,16	7,52	36,08	33,63	Fe	30,50	31,15
Zn	55,88	58,00	8,34	5,77	Co	0,00	0,00
Cu	0,05	2,23	Ni	2,59	Ni	0,00	0,00
S	32,72	32,16	As	21,88	Cu	34,23	33,44
			S	31,20	S	35,35	35,49
TOTAL	99,88	99,91	TOTAL	100,09	100,44	TOTAL	100,08
Fe	0,09	0,06	Fe	0,30	0,27	Fe	0,25
Zn	0,41	0,43	Co	0,07	0,04	Co	0,00
Cu	0,03	0,02	Ni	0,02	0,20	Ni	0,00
S	0,49	0,49	As	0,14	0,00	Cu	0,25
			S	0,54	0,49	S	0,50
BLENDE		SULFURES DE Ni-Co		CHALCOPYRITE			

Tabl. 1. - Composition chimique des sulfures.

Propriétés physiques des pyrrhotites

Le spectre de diffraction X réalisé sur un concentré de minéraux ferromagnétiques provenant de la carotte K15 entre - 3 060,50 et - 3 060,70 m a révélé une pyrrhotite monoclinique dépourvue de magnétite (à la sensibilité analytique), associée à des faibles proportions de quartz et de chlorite.

Un spectre de résonance paramagnétique électronique effectué sur ce même concentré a montré la présence de fer trivalent dans un site tétraédrique exclusivement. Ce fer trivalent que l'on peut donc supposer être lié à la pyrrhotite peut être exprimé sous forme d'inclusions inframicroscopiques de magnétite (minéral dans lequel le fer trivalent occupe le site tétraédrique) ou bien être en liaison avec le soufre dans le site tétraédrique de la pyrrhotite. Aucune trace de magnétite n'ayant été identifiée au microscope électronique à balayage, ni en diffractométrie, on peut supposer que le fer trivalent occupe le site tétraédrique avec le soufre.

Composition chimique des pyrrhotites (tabl. 1)

La composition chimique de la pyrrhotite est constante, quels que soient les faciès pétrographique qui la contiennent et les sulfures qui lui sont associés. Elle

répond à la formule 0,83-0,86 FeS, c'est-à-dire à celle de pyrrhotite monoclinique. Les infratracés de Ni et Co dosés ponctuellement correspondent probablement à des inclusions inframicroscopiques de sulfures de Ni-Co puisque les exsolutions flammées de ces sulfures sont fréquentes dans les pyrrhotites. Mais il n'y a pas de relation entre la présence de traces de Ni et Co dans la composition chimique ou d'inclusions de sulfures de Ni et Co avec la nature de la roche hôte (métabasites ou gneiss), ni avec l'habitus (disséminé ou en veinules) de la pyrrhotite.

Les paragenèses silicatées associées aux pyrrhotites sont des paragenèses de basse température : chlorite, albite, actinote ou biotite secondaire évoluant vers une composition de chlorite (appauvrissement en titane et potassium, enrichissement en fer, alumine et eau). Leur température de cristallisation est compatible avec la cristallisation de pyrrhotite monoclinique ($T < 325^\circ$), soit par cristallisation directe, soit par refroidissement de pyrrhotite hexagonale, soit sous l'action de solutions oxydantes.

Composition des sulfures associés à la pyrrhotite (tabl. 1)

La blende est associée localement à la pyrrhotite et à la chalcopryrite en cristaux de très petite taille ou en agrégats ; la teneur en fer de ces blendses semble présenter de légères variations mais la composition correspond toujours à un pourcentage moléculaire de 10 à 15 % de FeS indiquant une température de cristallisation inférieure à 400° (Scott, 1983).

Les sulfures de nickel analysés sont représentés par de la pentlandite et du glaucodot.

La chalcopryrite a une composition standard.

Étude isotopique du soufre des pyrrhotites du sondage Sancerre-Couy

L'étude minéralogique des échantillons silicatés du sondage de Sancerre-Couy a permis de mettre en évidence l'existence d'un hydrothermalisme dont la température est de l'ordre de 300 à 400 °C. Le dépôt des pyrrhotites, dont l'étude minéralogique a été présentée précédemment, est lié à cet hydrothermalisme. L'objet de ce travail est de déterminer les conditions de dépôt des sulfures et l'origine du soufre. De fait, dans le contexte du socle du Bassin parisien, le soufre peut aussi bien avoir une origine sédimentaire liée à la circulation de fluides per descensum, qu'une origine profonde liée à l'existence de magmatismes basiques.

Les pyrrhotites sélectionnées pour cette étude ont été prélevées avec soin entre - 1 628,50 m et - 3 456,90 m, dans des zones où la paragenèse minérale des minéraux silicatés associés est de type schiste vert. Les niveaux porteurs sont, soit basique, soit gneissique.

La pyrrhotite analysée se présente sous forme de filonnets ou disséminée dans la roche. Elle constitue 65 à 90 % de la paragenèse sulfurée, elle est accompagnée de chalcopryrite et ponctuellement de blende.

COTE	TYPE DE ROCHE	PARAGENESE I	PARAGENESE II	MINÉRALISATION Fe Ti	MINÉRALISATION SULFURÉE		$\delta^{34}\text{S}$
					habitus	paragenèse	
1755,50	Méta-basite	Hb brune + Pl	Ep-Ab-Trem-Prehn-Cc autour des sulfures	Sphène	Disséminée	Po+CPy-(Py)	- 22,5
1628,50	" "	Clx-Hb-Gt-Pl	Actinote	Ilm→Sph+Ru	Disséminée	Po-CPy-(Py)	- 7,1
3163,75	Gneiss rubanné	Biot I - Gt	Biot I → Biot II Gt	Ilm → Sph-Ru	Disséminée	Po(+Pe)-CPy-(B1) Graphite	- 7,1
3060,50	" "	" "	" " "	"	"	Po-CPy Graphite	- 9,9
3060,50	" "	" "	+ filonnets à Biot II	"	Filonnienne	Po-CPy- (B1)	- 7,8
2890,50	Cataclasite	Biot Gt Hb	Biot II-Act-CPx	Ru → Ilm	Filonnienne	Po-CPy-(Py)	- 2,2
3456,80	Gneiss rubanné cataclaté	Biot - Gt	Biot II → III	Ru → Ilm	Associée à Biot III	Po-CPy-(B1)	- 3,0

Tabl. 2. - Paragenèses ferrotitanée et sulfurée associées à la pyrrhotite ; paragenèses silicatées ; compositions isotopiques du soufre des pyrrhotites (les résultats sont exprimés en pour mille par rapport au CDT).

D'une façon générale, l'étude minéralogique montre que la forme disséminée semble être l'expression diffuse de la forme filonienne et non pas une minéralisation disséminée contemporaine du magmatisme basique.

Dans le tableau 2, sont reportées les compositions isotopiques du soufre des pyrrhotites, les paragenèses ferrotitanée et sulfurée associées à la pyrrhotite, et la paragenèse silicatée d'origine hydrothermale.

Il est nécessaire de déterminer les conditions physico-chimiques de formation des dépôts de sulfures avant d'interpréter les valeurs des compositions isotopiques. En effet, la composition isotopique des sulfures hydrothermaux ne reflète pas toujours celle du fluide hydrothermal. Ceci a été souligné par H. Sakai (1968) et développé dans un article de base par H. Ohmoto (1972).

L'étude minéralogique indique des conditions de dépôt en milieu réducteur. Il n'y a pas présence de sulfate ni de magnétite. L'ilménite observée n'est pas liée au dépôt des pyrrhotites, elle appartient à la paragenèse primaire dont le graphite reste stable.

Dans la gamme de températures considérées, 300 à 400 °C, le domaine de stabilité de la pyrrhotite correspond aux conditions de $f\text{O}_2$ et PH pour lesquelles le soufre présent dans le fluide hydrothermal est sous forme H_2S (H. Ohmoto, 1972). D'autre part, à 350 °C, température moyenne de dépôt, les fractionnements entre la pyrrhotite, la chalcopirite, la blende et H_2S sont du même ordre de grandeur, environ - 1 ‰. Le $\delta^{34}\text{S}$ du fluide minéralisateur sera donc de l'ordre de 1 ‰ plus élevé que celui des sulfures déposés.

Les $\delta^{34}\text{S}$ des pyrrhotites varient de - 22,5 à - 2,2 ‰ par rapport au CDT (Canon Diablo Troilite, standard international). Ces valeurs se répartissent en trois gammes :

- une valeur à - 22,5 ‰, nettement plus basse que toutes les autres, qui correspond à l'échantillon situé à - 1 755 m ;
- une gamme de valeurs entre - 9,9 et - 7,1 ‰ ;
- deux valeurs plus élevées, à - 3,0 et - 2,2 ‰.

Les échantillons de pyrrhotite de la gamme intermédiaire, - 9,9 à - 7,1 ‰, se situent aussi bien dans des roches basiques que dans des roches acides, à des profondeurs différentes, et à l'état disséminé ou filonien. Les valeurs relativement groupées donnent probablement une bonne idée de l'homogénéité du fluide hydrothermal. D'après ce que nous avons détaillé précédemment ce fluide aurait eu une composition isotopique comprise entre environ - 9 et - 6 ‰.

Cette valeur de $\delta^{34}\text{S}$ du fluide hydrothermal indique plutôt une origine sédimentaire du soufre qu'une origine profonde. En effet, le soufre magmatique à une valeur relativement bien définie de l'ordre de 0 ‰ (M.-L. Jensen, 1967). Les composés soufrés d'origine sédimentaire ont par contre une gamme de $\delta^{34}\text{S}$ extrêmement étendue (entre - 40 à + 40 ‰ pour les plus courants). Ils proviennent des sulfates sédimentaires dont la valeur moyenne est de l'ordre de + 20 ‰ (C.-E. Rees *et al.*, 1978) mais qui, après réduction bactérienne ou réduction chimique, conduisent à des sulfures de compositions isotopiques diverses suivant les conditions de la réduction.

Ces sulfures peuvent être ensuite remobilisés, oxydés, à nouveau réduits, dans des conditions différentes, qui entraînent des fractionnements isotopiques importants.

En ce qui concerne les deux échantillons à - 2,2 et - 3,0 ‰, respectivement aux cotes - 2 890,50 et - 3 456,80 m, il est important de signaler qu'ils se situent tous les deux dans des roches très mylonitiques à biotite rétrograde (hydrothermale ?). En effet, ils proviennent, l'un du sondage principal, l'autre de la portion déviée, mais suivant le pendage ils appartiennent, en fait, au même niveau où se situe un contact entre le gneiss et l'amphibolite, dans une shear zone. Il s'agit essentiellement de pyrrhotite qui apparaît disséminée et aussi en filonnets tardifs non cataclasés. A ce niveau, on note la présence de galène (échantillon à - 3 456,80 m) qui n'a pas été observée ailleurs.

Les valeurs observées pour ces échantillons de pyrrhotite indiqueraient, a priori, des valeurs de - 1 à - 2 ‰ pour le fluide hydrothermal, ce qui pourrait tra-

duire une origine magmatique du soufre. Toutefois, les observations faites sur les échantillons indiquent qu'on a plutôt affaire à une remobilisation des sulfures dans cette zone cataclasée, dans des conditions physico-chimiques différentes de celles du dépôt initial, ce qui expliquerait la variation de $\delta 34S$.

L'échantillon situé à - 1 755 m, de $\delta 34S$ égal à - 22,5 ‰, est sous forme disséminée dans une amphibolite ; il existe une auréole de rétro-morphose autour de la pyrrhotite et autour des silicates primaires, avec calcite et prehnite. Cette observation laisse à penser qu'une deuxième circulation de fluide a eu lieu ou bien qu'il y a eu une évolution importante au cours du refroidissement du système lors de la circulation hydrothermale. Il n'est pas possible de dire si on a eu remobilisation de sulfures ou apport de sulfures. La composition isotopique de cet échantillon, très différente des autres, est en accord avec l'existence d'un phénomène secondaire.

En conclusion, les compositions isotopiques du soufre des pyrrhotites sélectionnées pour cette étude sont plutôt en accord avec une origine sédimentaire du soufre.

Les pyrrhotites du socle à Sancerre-Couy ont probablement été déposées par un fluide hydrothermal ayant lessivé des sulfures ou des sulfates d'origine sédimentaire, que ceux-ci soient primitivement associés aux séries d'origine métamorphique du socle comprenant des termes paradérivés, ou transportés depuis la couverture mésozoïque dans des circuits convectifs plus récents mais de plus haute température que ceux qui fonctionnent semble-t-il actuellement (J. Boulègue *et al.*, 1990). Ce dernier cas pourrait s'appliquer aux sulfures à $\delta 34S$ de - 22 apparemment plus tardifs (à - 1 755 m).

Données géochronologiques sur les paragenèses silicatées associées à la pyrrhotite

L'observation et l'étude des minéralisations sulfurées recoupées par le forage de Couy montrent que l'on peut distinguer plusieurs paragenèses différentes, probablement liées à des événements hydrothermaux successifs ; afin de situer ces événements dans le temps, nous avons essayé (avec S. Costa et J.-Y. Calvez) de dater ces paragenèses grâce aux phases silicatées qui leur sont associées.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus.

MINERAL	COTE	METHODE & AUTEURS	RESULTATS
Biotites I	964 ■	$^{39}Ar/^{40}Ar$ - S. COSTA <i>et al.</i>	380 Ma - Age de la structuration tangentielle - faciès amphibolite
Ambiboles I	987 ■		
Biotites II	3060,50 ■	K/Ar - JY CALVEZ (BRGM)	336 Ma - Age des cisaillements et de l'hydrothermalisme associé I
	3454 ■	$^{39}Ar/^{40}Ar$ - S. COSTA <i>et al.</i>	317 Ma
Ambiboles II	3374,56 ■	K/Ar - JY CALVEZ	297 Ma - Hydrothermalisme II
Biotites d'une trachy-andésite	938 ■	$^{39}Ar/^{40}Ar$ - S. COSTA <i>et al.</i>	301 Ma
Biotites d'un lamprophyre	3312,23 ■	K/Ar - JY CALVEZ	292 Ma
Biotites d'un lamprophyre	3453 ■	$^{39}Ar/^{40}Ar$ - S. COSTA <i>et al.</i>	301 Ma

} Magmatisme
post-tectonique

Ces données caractérisent clairement la mise en place des dykes de lamprophyre à 300 Ma. Le moment de l'hydrothermalisme fissural majeur peut être discuté par rapport à cet événement.

1) L'âge obtenu (297 Ma) sur les actinotes se développant tardivement dans les gneiss rubanés (à - 3 374 m) est sensiblement le même que celui des lamprophyres et des trachy-andésites (~ 301 Ma), c'est-à-dire stéphanien.

2) Par contre les deux âges à 336 et 317 Ma sur les biotites des blastomylonites syn-D2 sont moins fiables. A - 3 060 m, il y a des clastes de biotite I dans le concentré de biotite II analysé en K/Ar et l'âge peut-être vieilli. Quant à l'échantillon pris à - 3 454 m pour la datation $^{39}Ar/^{40}Ar$, il est probable que la proximité du lamprophyre daté à 301 Ma (- 3 453 m) ait influencé la composition isotopique des biotites ; l'hydrothermalisme associé aux cisaillements pourrait se situer autour de 320 Ma, période à laquelle s'initie le jeu sénestre ductile du Sillon houiller (déformation D3).

Conclusion

Les fortes valeurs de susceptibilité magnétique mesurées sur échantillon et les pics importants visibles sur les diagraphies magnétiques du forage de Sancerre-Couy, sont en relation directe et exclusive avec la présence de pyrrhotite dans les roches du socle. Celle-ci étant liée à deux événements hydrothermaux postérieurs au métamorphisme principal et à la déformation qui lui est associée, il n'y a aucune raison d'associer a priori le magnétisme à une lithologie particulière.

Les déformations encaissées par les roches postérieurement au métamorphisme principal, les données minéralogiques et géochronologiques sur les silicates accompagnant les pyrrhotites, l'habitus des pyrrhotites, leur composition uniforme et la nature des minéraux ferrotitanés associés, suggèrent que l'hydrothermalisme est d'âge syn- à post-blastomylonitisation et de conditions physico-chimiques fluctuantes. Mais la cause et les contrôles de cet hydrothermalisme ne sont pas clairement identifiés.

L'épisode le plus récent associé aux filons bréchiques à carbonates ne peut être relié à des percolations de fluides provenant de circuits alimentés par les eaux météoriques, marines ou connées des sédiments de la couverture mésozoïque, à cause de la composition isotopique des carbonates, interprétée grâce aux inclusions fluides primaires salées qu'ils piègent (M. Pagel, ce volume). L'histoire thermique de la couverture et du socle au Lias, déterminée par la disparition des traces de fission de l'apatite suggère de relier cet épisode hydrothermal à l'effet du magmatisme alcalin stéphanien (300 Ma), plutôt qu'à un hydrothermalisme liasique (M. Pagel, 1992).

Les inclusions fluides des gneiss du socle, très polyphasées (M. Pagel) s'accordent avec la forte probabilité d'une percolation tardi-métamorphique lors des déformations rétrogrades ductile (D2) puis ductile-cassante (D3) entre 380 et 320 Ma.

C'est pendant cette période que la sulfuration de haute température fissurale et disséminée (associée au métamorphisme rétrograde), a la plus grande probabilité de s'être produite.

Références

- BOULÈGUE J., BENEDETTI M., GAUTHIER B., BOSCH B. (1990). - Les fluides dans le socle du sondage GPF Sancerre-Couy. *Bull. Soc. géol. Fr.*, (8), 6, n° 5, pp. 789-795.
- CASTAING C. *et al.* (1988). - Résultats préliminaires de l'étude structurale des carottes orientées de socle du forage de Sancerre-Couy (A.M.B.P.). Documents du BRGM, n° 137, pp. 127-146.
- CHAT C. (1990). - Étude pétrologique d'une pyrigarnite du forage de Couy-Sancerre. Rapport de stage GE405, Univ. Paris VII.
- COSTA S. (1988). - Nouvelles données ^{39}Ar - ^{40}Ar sur les gneiss mylonitiques à - 3 500 m et interprétation. Documents du BRGM, n° 137, pp. 235-237.
- COSTA S., MALUSKI H. (1988). - Datations par la méthode ^{39}Ar - ^{40}Ar de matériel magmatique et métamorphique paléozoïque provenant du forage de Sancerre-Couy (Programme GPF). Documents du BRGM, n° 137, pp. 215-223.
- HOTTIN A.-M., CALVEZ J.-Y. (1988). - Résultats analytiques sur quelques minéraux du forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 137, pp. 225-234.
- JENSEN M.L. (1967). - Sulfur isotopes and mineral genesis, in Barne, H.L., ed., *Geochemistry of Hydrothermal Ore Deposits*: New York, Holt, Rinehart and Winston, Inc., pp. 143-165.
- KOSAKEVITCH A. (1987). - Analyse par la méthode RPE de l'échantillon du sondage de Couy à - 3 060,50 m. Note PGM n° 163, BRGM.
- OHMOTO H. (1972). - Systematics of Sulfur and Carbon Isotopes in Hydrothermal Ore Deposits. *Econ. Geol.*, 67, pp. 551-578.
- PAGEL M. (1992). - Inclusions fluides dans le socle du forage profond de Sancerre-Couy (ce volume).
- REES C.E., JENKINS W.J., MONSTER J. (1978). - The sulphur isotopic composition of ocean sulphate. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, pp. 377-381.
- SAKAI H. (1968). - Isotopic properties of sulfur compounds in hydrothermal processes. *Geochem. J.*, 2, pp. 29-49.
- SCOTT S.D. (1983). - Chemical behaviour of sphalerite and arsenopyrite in hydrothermal and metamorphic environments. *Min. Mag.*, 47, pp. 427-435.
- TURLAND M. *et al.* (1988). - Suivi du forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 137, pp. 39-66.