

Caractéristiques chimiques et thermodynamiques des circulations hydrothermales du site d'Échassières

Mohammed Aïssa⁽¹⁻²⁾, Alain Weisbrod⁽¹⁻²⁾ et Christian Marignac⁽³⁾

Mots-clés : Inclusions fluides, Thermodynamique, Wolframite, Topaze, Granite, Convection, Phase fluide, Magma Allier, Échassières.

Résumé

L'étude minéralogique et d'inclusions fluides, réalisée sur des échantillons du sondage Ech. 1, ainsi que sur des échantillons de surface de la carrière de la Bosse, a permis de mettre en évidence les résultats suivants.

1. — Les fluides du stockwerk à ferberite sont des fluides aquo-carbo-azotés (« COHN ») ; 0,2 à 5 mol. % de $\text{CO}_2 + \text{CH}_4 + \text{N}_2$ de densité moyenne (0,4 à 0,7). La dilution de ces fluides par des fluides entièrement aqueux et plus froids a entraîné la précipitation de la wolframite.

2. — L'existence d'inclusions partiellement décrépitées (densités 0,15 à 0,40) résulte d'un réchauffement du stockwerk ($\sim 600^\circ\text{C}$ dans la zone de prélèvement des échantillons), dû lui-même à l'intrusion du granite des Colettes.

3. — Cette décrépitation a été utilisée pour estimer les conditions de pression (1 000-1 200 bars) et de température (600 à moins de 400°C) de circulation des fluides du stockwerk.

4. — Les conditions de mise en place du granite de Beauvoir ont été estimées à environ 570°C , 800 bars.

5. — Les premiers fluides du faciès B1 de Beauvoir sont des saumures magmatiques (25-30 % pds NaCl). L'exsolution de ces saumures hors du magma B1 entraîne une surpression fluide, puis une fracturation hydraulique : on passe ainsi de 700-800 bars, 500°C , à 100-200 bars, 350-400 °C.

6. — Cette décompression quasi-adiabatique entraîne l'ébullition des saumures magmatiques, en vapeurs aqueuses peu denses et peu salées et saumures extrêmement salées.

7. — Des fluides extérieurs envahissent ensuite le granite par la base, à des températures de 350 à 410°C . Ces fluides de faible salinité (2-6 % pds NaCl), contribuent à refroidir le système et, localement (essentiellement dans le granite B1), diluent les saumures précoce.

8. — Le résultat de ces mélanges conduit à des fluides plus froids ($T < 350^\circ\text{C}$) et de salinités très variables (10 à 60 % pds NaCl). Toutefois, dans quelques fractures, des saumures non « contaminées » continuent à bouillir et, au moins dans certains cas, ont dû atteindre la surface.

9. — Finalement, l'intervention de fluides extérieurs de plus en plus froids, en dissipant la chaleur du système, entraîne la fin des circulations convectives du site d'Échassières.

Abstract

Chemistry and thermodynamics of the hydrothermal circulations in the Échassières district

A fluid inclusion and mineralogical study has been performed on various samples from the drilling « Échassières 1 » and from surface samples in the Échassières district (northern French Massif central). From the obtained results, it was possible to reconstruct the hydrothermal evolution, in relation with the magmatic events. Three stages have been recognized.

1. — Formation of the Bosse stockwerk (wolframite-bearing quartz veins) and associated aplite veins. This event is supposed to be related to the still hypothetical intrusion of the Bosse granite. The earliest aqueous fluids in the quartz veins (« COHN fluids ») contain significant amounts (up to 5 mol. %) of CO_2 , CH_4 and N_2 in various proportions. Their density is low to moderate (0,15 to 0,70). However, the lower densities (0,15 to 0,40) result from partial decrepitation of inclusions, the initial density of which was higher than 0,70. The dilution of these early hot (450-600 °C) volatile bearing fluids by colder aqueous ones resulted in wolframite (ferberite) precipitation between 300 and 400 °C.

2. — Intrusion of the Colettes granite. This granite crosscuts the Bosse stockwerk and is responsible for the decrepitation of a part of the stockwerk COHN inclusions. Combining the maximum temperature reached at that time in the stockwerk sampling area ($\sim 600^\circ\text{C}$) and the limiting density (0,70) of the non-decrepitated COHN inclusions in the quartz-wolframite veins, permits to estimate the pressure of entrainment of these volatile-bearing fluids (1 000-1 200 bars).

3. — Intrusion of the successive sheets (B3, B2, B1) of the Beauvoir granite. Most of the associated hydrothermal events are related to the B1 facies. The pressure of emplacement of the Beauvoir granite (~ 800 bars) was estimated by combining the solidus temperature of this granite (560 - 580°C) and the density of the earliest brines. These brines (25-30 wt % eq. NaCl), enriched in alkalis (Na, Li, K), Al, fluorine, niobium, etc., unmixed from the B1 magma. An over-pressure built up, yielding hydraulic fracturing and changing the fluid regime from lithostatic to hydrostatic. During this process, the fluid pressure dropped quasi-adiabatically from 700-800 bars, 500°C to 100-200 bars, 350-400 °C. Consequently, the early magmatic brines unmixed into low-density aqueous vapours and high density-very high salinity brines.

(1) École Nat. Sup. de Géologie (I.N.P.L.), B.P. 452, 54001 Nancy Cedex

(2) Centre de Rech. Pét. et Géoch. (C.N.R.S.), B.P. 20, 54501 Vandœuvre Cedex

(3) École Nat. des Mines (I.N.P.L.), Parc de Saurupt, 54000 Nancy

Those three early fluids reacted with the quartz-wolframite veins of the Bosse stockwerk : the quartz was partly dissolved and replaced with topaz and Li-rich micas. During this operation, a small part of the COHN fluid inclusions of the stockwerk were re-trapped into a few new-formed topaz. Some of these topaz, as well as other xenolithic materials (pieces of quartz, microgranite, micaschists ...) were pull out of the stockwerk and dragged into the ascending B2 magma.

Low salinity (2-6 wt % eq. NaCl) fluids of likely outer origin circulated from the bottom to the top of the Beauvoir granite at temperatures ranging from 350 to 410 °C. This convective circulation is related to the presence of a source of heat that was still remaining in the center of the Beauvoir granite. Indeed these aqueous fluids mixed with the early brines, yielding in the B1 granite, fluids of salinities ranging from 10 to 60 wt % eq. NaCl. However, some of these brines, circulating in expanding fractures, were still unmixed and soon reached the saturation with respect to halite and, in some cases, sylvite. These boiling fluids probably reached the surface at that time.

Finally, the increasing invasion of cold outer waters dissipated the remnant of the heat, stopping the fluid evolution of the Échassières district.

Introduction

Dans la croûte, les circulations de fluides plus ou moins aquueux sont responsables d'importants transferts de matière (phénomènes métasomatiques, dépôts de minéralisations) et de chaleur. Les propriétés chimiques des fluides fossiles profonds peuvent être indirectement estimées à partir des interactions entre ces fluides et des associations minérales particulières. Toutefois, cette approche conduit le plus souvent à des résultats partiels, voire erronés (rééquilibrages successifs de phases minérales). En outre, elle est inopérante pour la détermination des concentrations en espèces volatiles (CO_2 , CH_4 , N_2 ...) et des propriétés physiques (densité en g. cm⁻³, immiscibilité) des fluides impliqués.

Depuis une quinzaine d'années, les études d'inclusions fluides ont largement démontré l'importance de leur contribution à la caractérisation physico-chimique des paléofluides, particulièrement dans les systèmes hydrothermaux. Les méthodes d'études sont aujourd'hui bien connues et on se contentera d'en rappeler les techniques essentielles :

- étude pétrographique des inclusions fluides, et en particulier établissement d'une chronologie des différentes générations, basée sur la typologie, les relations mutuelles et la répartition des inclusions dans leurs minéraux-hôtes (quartz et topaze essentiellement) (Aïssa, 1987),
- analyse microthermométrique (mesure des températures des changements de phases observés dans les inclusions entre -150 et +600 °C)
- analyse des proportions en volatils par spectroscopie RAMAN (microsonde MOLE).

Le travail présenté ici s'appuie essentiellement sur ce type d'approche. Pour des raisons évidentes, il n'a pas été possible de faire figurer le détail des résultats de l'étude microthermométrique : on consultera à ce sujet la thèse de M. Aïssa (1987). Bien entendu, un résumé de ces données est présenté dans chaque partie de cet article.

Les échantillons étudiés ont été prélevés :

- en surface, dans la carrière de la Bosse (filons à quartz, wolframite, topaze, micas... du stockwerk de la Bosse),
 - sur des fragments de carotte du sondage Ech. 1, aux niveaux répertoriés ci-dessous. Les minéraux-hôtes des inclusions étudiées sont indiqués entre parenthèses.
- 98,4 : contact granite-aplite partiellement greisénisé, recoupé par filon de quartz sécant (quartz du granite),
 99,6 : contact granite greisénisé-filon de quartz (quartz du granite),

207,9 : granite B1 « sain » (quartz et topaze),
 339,8 : granite B1 un peu altéré (quartz et topaze),
 379,5 : lentille de quartz recristallisé, dans le granite B1 (quartz et topaze du granite, quartz de la lentille)
 509,5 : granite de la transition B1-B2 (quartz et topaze),
 666,2 : granite B2 (quartz et topaze)
 708,0 : microgranite (quartz),
 728,3 : granite B2 (quartz)
 817,4 : granite B3 (quartz) et enclave (?) de quartz à wolframite (quartz),
 822,1 : filon de quartz à wolframite et topaze dans une enclave de micaschistes (quartz et topaze du filon),
 833,6 : greisen (enclave ?) dans granite B3 (quartz et topaze),
 879,2 : filon de quartz à wolframite et topaze dans micaschistes (quartz),
 895,6 : filon de quartz à wolframite, sulfures et fluorine (quartz, fluorine).

Les « quartz » des granites et microgranites sont les quartz globuleux ; les topazes sont les topazes I précoces de Rossi et al. (ce volume)

1. — Le stockwerk à quartz-wolframite

1-1. — Caractères généraux des fluides du stockwerk

Rappelons tout d'abord que le stockwerk minéralisé de la Bosse s'est constitué en deux temps bien distincts (Aïssa, 1987 ; Aïssa et al., ce volume) :

- mise en place d'un réseau filonien à quartz et wolframite pauvre en niobium,
- remplacement partiel (localement total) du quartz initial par la topaze et les micas blancs fluorés et lithinifères, avec enrichissement en niobium de la wolframite.

Plusieurs types d'inclusions ont été catalogués dans le quartz et la topaze des filons minéralisés du stockwerk :

- des inclusions aquo-carbo-azotées de densités modérées, essentiellement dans le quartz, beaucoup plus rarement dans la topaze ; ces fluides, dont les espèces essentielles sont l'eau, le dioxyde de carbone, le méthane et l'azote, en proportions variables (fig. 3), seront dorénavant désignées par le vocable COHN (carbone-oxygène-hydrogène-azote),
- des inclusions aqueuses denses extrêmement salées, coexistant avec des inclusions aqueuses peu salées, de faible densité : ces deux types homogénéisent dans la même gamme de température et se rencontrent surtout comme inclusions primaires dans la topaze ; on en trouve également, en moindre abondance, dans des inclusions secondaires du quartz, sauf toutefois dans la partie profonde du stockwerk.

— des inclusions aqueuses tardives peu salées, de densités modérées à faibles, surtout dans le quartz mais aussi, en moindre abondance, dans la topaze.

En laissant de côté ces derniers fluides, que l'on rencontre dans pratiquement toutes les formations d'Échassières, toujours avec un caractère nettement tardif, les caractères des inclusions confirment l'évolution biphasée du stockwerk, telle qu'on a déjà pu la mettre en évidence à partir des relations structurales et de la succession des paragenèses. En ce qui concerne les circulations hydrothermales, on peut donc distinguer :

- une première étape, caractérisée par le piégeage, dans le quartz initial, de fluides aquo-carbo-azotés (COHN) auxquels est associé le dépôt de la wolframite (voir plus bas),
- une seconde étape, marquée par les fluides précoces de la topaze (liquides chauds très salés et vapeurs chaudes peu salées).

On peut être surpris par la faible abondance, dans le quartz « ancien », des fluides de la topaze. En fait, on a vu que le dépôt de la topaze s'accompagne d'une dissolution du quartz du stockwerk, vraisemblablement par des solutions aqueuses chaudes riches en fluor, lithium, etc.; dans ces conditions, le piégeage de ces fluides dans le quartz paraît, sinon impossible, du moins difficile. On verra plus bas que les fluides caractéristiques de la topaze du stockwerk sont en fait les fluides du granite de Beauvoir, et plus précisément du faciès B1 de ce granite. On démontre ainsi que le second stade de l'évolution du stockwerk est une conséquence directe de l'intrusion du granite de Beauvoir.

1-2. — Caractérisation des circulations fluides précoces dans les filons à quartz-wolframite du stockwerk

Les inclusions COHN du quartz du stockwerk peuvent être subdivisées en trois types morphologiques, toujours intimement associés :

- inclusions « normales », de forme simple, de diamètre moyen $20\mu\text{m}$; elles homogénéisent en phase liquide, critique ou vapeur, entre 280 et 400°C ;

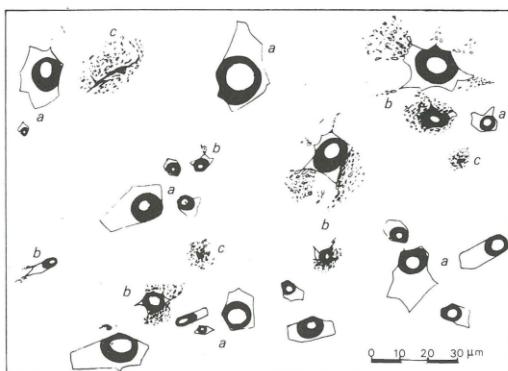


Fig. 1. — Inclusions COHN du quartz du stockwerk
a = inclusions intactes; b = inclusions partiellement décrépitées; c = inclusions totalement décrépitées.

COHN fluid inclusions from the quartz veins of the ferberite stockwork
Inclusions : a/non décrépitée, b/partiellement décrépitée, c/totalement décrépitée.

— inclusions de tailles comparables aux précédentes, mais à morphologie plus complexe, avec amores de formes étoilées auxquelles s'associent presque toujours de très petites inclusions groupées en halos, nuages ou disposées le long de courtes microfissures courbes prolongeant les « branches » des étoiles (fig. 1); cette morphologie est très caractéristique d'une décrépitation partielle d'inclusions « normales » (Gratier et Jenatton, 1983; Pêcher, 1981, 1984; Pêcher et Bouillier, 1984; Roedder, 1984; Swanenberg, 1980); les inclusions « mères » homogénéisent généralement en phase vapeur entre 380 et 410°C ;

— rares amas denses de très petites inclusions, non analysables, qui représentent vraisemblablement le résultat d'une décrépitation totale.

La composition globale et la densité des inclusions COHN des deux premiers types ont été calculées à partir des mesures microthermométriques, du rapport volumique liquide/vapeur et des rapports molaires relatifs de CO_2 , CH_4 , N_2 , mesurés en microspectroscopie RAMAN. Les valeurs utilisées sont données dans le tableau I. Pour la méthode de calcul, on se reportera à Ramboz (1980), Ramboz et al. (1985). Les résultats (fig. 2 et 3) présentent une intéressante distribution des compositions et des densités entre les deux types d'inclusions analysées :

- les fluides COHN des inclusions non décrépitées (inclusions « normales ») ont des densités faibles à moyennes (0,4 à 0,7) et montrent une très bonne corrélation positive entre ces densités et la teneur en eau : cette situation est très classique dans les évolutions polythermales plus ou moins isobares (Ramboz et al., 1985; Ramboz, 1986; Weisbrod, 1982, 1986) avec dilution de fluides carbo-azotés par un autre fluide essentiellement aqueux.
- les fluides COHN des inclusions partiellement décrépitées ont des densités très faibles (0,15 à 0,40) et aucune corrélation densité-teneur en eau n'est observable ; bien entendu, ces densités anormalement basses résultent d'une chute de la densité initiale par perte partielle de matière lors de la décrépitation.

Postérieurement à sa formation, le stockwerk de la Bosse a donc subi un événement ayant entraîné la décrépitation d'une partie seulement des inclusions COHN initiales. Le fait de trouver associées, dans un même échantillon, des inclusions intactes et des inclusions décrépitées, ainsi que l'absence de déformations significatives des quartz-hôtes indiquent qu'il s'agit d'un événement thermique important. Cet événement ne peut être attribué à l'intrusion du granite de Beauvoir, en raison de son faible volume et de sa très basse température solidus. Finalement, seule l'intrusion du granite des Colettes peut être tenue pour responsable d'un réchauffement suffisant pour faire décrépiter une partie des inclusions. On verra plus bas que la température maximale atteinte par les échantillons étudiés a été estimée à 560 - 620°C .

Considérons les fluides COHN les plus denses des inclusions non décrépitées ($d \sim 0,7$). Aux températures de 560 - 620°C , la pression interne de ces inclusions atteint 2 000 à 2 500 bars. Si l'on estime à 800-1 000 bars la surpression nécessaire à la décrépitation d'une inclusion (Leroy, 1979; Pêcher et Bouillier, 1984), on aboutit à une pression *minimale* de 1 000 à 1 700 bars pour le piégeage initial de ces fluides.

Compte tenu de leurs similitudes de répartition, de taille et de forme, on ne peut expliquer la présence d'inclusions

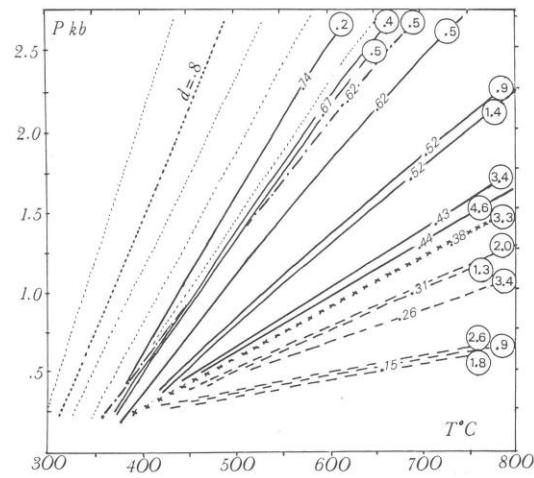
N° échantillon	Roche-hôte	Minéral-hôte	Microthermométrie				Rap. relatifs volatils			Composition globale (moles%)				Densité Globale	
			Vaq (vol.%)	Th°C	T _{FG}	T _{FC}	CO ₂ %	CH ₄ %	N ₂ %	H ₂ O	NaCl	CO ₂	CH ₄	N ₂	
4,17 y	Stockwerk sup.	Q	40		-2,7	5,4	48,7	17,5	33,8	93,74	1,70	2,54	0,69	1,33	0,44
4,17y	" "	Q	15	375 V	?	7,5	34	20	46	97,36	-	0,98	0,50	1,15	0,15
4,17 y	" "	Q	15	379 V	?	6,0	83	17	-	99,06	-	0,79	0,14	-	0,15
Be Z	" "	Q	60	355 L	-2,4	7,5	26,3	22,2	51,5	98,24	1,26	0,22	0,08	0,20	0,62
Be M	" "	Q	65	368 L	-3,3	3,1	45,3	15,2	39,5	97,89	1,71	0,26	0,04	0,10	0,67
4,32 z	" "	Q	50	355 L	-2,1	1,8	55,9	11,3	32,8	97,96	1,10	0,65	0,07	0,22	0,52
4,32 t	" "	Q	30	293 V	?	4,8	64,8	-	35,2	98,00	-	1,42	-	0,58	0,31
66 d1	" "	Q	50	367 C	-3,2	8,0	70	30	-	96,92	1,66	1,14	0,28	-	0,52
66 d1	" "	Q	40	361 L	-3,3	6,7	-	100	-	94,93	1,66	-	3,39	-	0,43
66 b5	" "	Q	65	342 L	-3,3	3,3	39	19	42	97,82	1,71	0,27	0,06	0,13	0,67
879,23	Stockwerk in f.	Q	15	352 V	?	10,8	52	9	39	98,19	-	1,11	0,13	0,56	0,15
879,23	" "	Q	30	363 L	?	10,6	84	16	-	98,68	-	1,15	0,16	-	0,31
879,23	" "	Q	70	328 L	-5	7,6	48	-	52	97,03	2,74	0,16	-	0,07	0,74
379,50	Enclave Q dans B1	Q	25	382 V	-3,6	2,9	70	17	13	97,52	1,84	0,48	0,09	0,07	0,62
708	Microgranite	Q	35	390 V	-3,2	7,3	48	13	39	95,10	1,60	1,84	0,37	1,10	0,38
833,60	Greisen	Q	20	358 V	?	7,1	49	9	42	96,62	-	1,88	0,26	1,23	0,26

Tabl. 1. — Fluides aquo-carbo-azotés (COHN) du quartz du stockwerk et d'enclaves du granite de Beauvoir
vaq : pourcentage volumique de la partie aqueuse de l'inclusion. Th : température d'homogénéisation $V + L = V$, L ou C (V = vapeur, L = liquide, C = critique). T_{JG} : température de fusion de la glace. T_{JF} : température de fusion des clathrates.

intactes aux côtés d'inclusions décrépitées que par des densités plus élevées (supérieures à 0,7) de ces dernières. Par exemple, une inclusion hypothétique de densité 0,8, portée à 560–620 °C, atteint une pression interne de 3,5 à 4,5 kbars, soit une surpression d'au moins 2 kbars, largement suffisante pour faire décrépiter cette inclusion. Ce phénomène explique aussi l'absence, dans le quartz du stockwerk, de fluides de densité 0,7–0,9 et à teneur extrêmement faible (inférieure à 0,4%) en volatils, fluides que l'on rencontre par ailleurs quasi-systématiquement dans les phases tardives des circulations COHN associées aux minéralisations stanno-wolframifères (Weisbrod, 1982, 1986, 1987). En réalité, des reliques de ces fluides s'observent dans le quartz : ce sont les inclusions partiellement décrépitées, à très faible densité (0,15 à 0,40). Bien entendu, leurs propriétés physiques – et probablement aussi chimiques – ont été considérablement modifiées lors de la décrépitation.

Quoique la wolframite précipite généralement en-dessous de 400 °C (Naumov et Ivanova, 1971; Ivanova, 1986; Ivanova et Naumov, 1987), des températures de piégeage nettement plus élevées ont été enregistrées sur des fluides aquo-azotés impliqués dans la genèse de minéralisations du type filons de quartz stanno-wolframifère (Bennani *et al.*, 1987; Boutaleb *et al.*, 1986; Cheilletz, 1984; Dubessy *et al.*, 1987; Durisova, 1987; Durisova *et al.*, 1979; Giuliani, 1984; Giuliani & Weisbrod, 1986; Kelly & Rye, 1979; Noronha & Mangas, 1987; Noronha *et al.*, 1987; Noyé, 1985; Noyé *et al.*, 1986; Ramboz, 1980, 1986; Ramboz *et al.*, 1985; Weisbrod, 1982, 1986, 1987). Toutefois, aucune des températures ainsi estimées n'atteint 650 °C. Compte tenu de l'évolution rétrograde des fluides dans ce type de processus (température et teneur en volatils décroissantes, densité et teneur en eau décroissantes ; cf. auteurs ci-dessus), les fluides COHN les plus précoce piégés dans le quartz du stockwerk d'Échassière correspondant aux isochores de densité 0,40–0,45 (fig. 2) (bien entendu, les fluides de densité inférieure, correspondant à des inclusions plus ou moins décrépitées, ne sont pas pris en compte). Appliquée à ces isochores, la valeur par

excès de 650 °C conduit à une pression maximale de 1 200 bars. Dans la quasi-totalité des circulations fluides convecti-



ves qui ont été étudiées (cf. auteurs ci-dessus et Burnham, 1979; Ivanova & Naumov, 1987; Norton, 1984; Toumlin & Clark, 1967; Weisbrod, 1981, 1982, 1984, 1987; Weisbrod & Poty, 1975; Weisbrod & Marignac, 1987), la pression fluide peut rester à peu près constante, mais le plus souvent décroît plus ou moins rapidement. A Échassières, aucun argument ne permet d'envisager, pour la suite de l'évolution, une augmentation significative de la pression fluide. Aussi retiendrons-nous la *pression maximale* de 1 200 bars pour la formation du stockwerk.

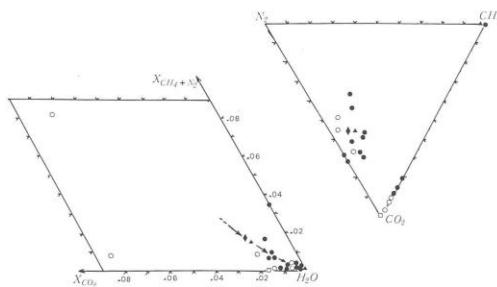


Fig. 3. — Composition des fluides aquo-carbo-azotés.
3a = H_2O , CO_2 , $CH_4 + N_2$; 3b = CO_2 , CH_4 , N_2 . Cercles pleins = quartz du stockwerk ; losange plein = enclave de quartz dans B 1 ; triangles pleins : quartz du microgranite dans B 2 ; cercles vides = topaze du granite B 2 ; carré vide = topaze du stockwerk. Les flèches de la fig. 3a indiquent la dilution croissante des fluides carbo-azotés par l'eau.

Compositions of the COHN fluids.

3a = H_2O , CO_2 , $CH_4 + N_2$; 3b = CO_2 , CH_4 , N_2 . Solid circles = inclusions from the vein quartz; solid diamonds = quartz nodule in the Beauvoir granite B 1; solid triangles = quartz from a microgranite; empty circles = topaz from the Beauvoir granite B 2; empty square = topaz from the stockwerk. On fig. 3a, the arrows indicate the increasing dilution of the COHN fluids by water.

Finalement, on peut estimer à 1 000-1 200 bars la pression de formation du stockwerk de la Bosse. En termes de pression lithostatique, cela implique une profondeur d'environ 3,7 à 4,5 km.

Il ne paraît pas possible, dans l'état actuel des connaissances, de remonter à la source des constituants volatils des fluides COHN. Toutefois, la grande variabilité des rapports $CO_2/CH_4/N_2$ (fig. 3b) indique l'absence d'équilibre chimique entre les diverses espèces du système. Ce fait important a deux conséquences :

— les sources de ces volatils sont diverses : ceci n'exclut pas une origine en partie granitique, mais entraîne obligatoirement l'intervention d'autres sources (fluides métamorphiques ?).

— ces fluides n'ont pas supporté des températures suffisamment élevées pendant des temps suffisamment longs pour que l'équilibre chimique homogène puisse être réalisé (Dubessy, 1984; Ramboz et al., 1985).

Quoiqu'il en soit, on sait que l'évolution, déjà bien amorcée dans ces fluides COHN, et qui résulte du mélange de fluides carboniques chauds (métamorphiques ou magmatiques ?) et d'eau plus froide (météorique ?) constitue un mode classique de précipitation d'oxydes tels que la wolframite

(Drummond, 1981; Giuliani, 1984; Ramboz et al., 1985; Noyé, 1985; Dubessy et al., 1987; Weisbrod, 1982, 1987).

2. — Le granite des Colettes : conditions de mise en place

Trois intrusions granitiques (dont la première reste hypothétique) se sont successivement mises en place dans les formations métamorphiques de la Sioule, sur le site d'Échassières : granite de la Bosse(?) ; granite(s) des Colettes, granite(s) de Beauvoir. L'organisation relative de ces intrusions (Cuney, 1984; Cuney et al., 1986) confirmant des observations antérieures (Aubert, 1969), suggèrent un événement tectonomagmatique unique (quoique polyphasé dans le détail) plutôt que plusieurs événements distincts très décalés dans le temps. Cette pénécontemporanéité des intrusions est confirmée par l'étude structurale du site (Jacquot et Gagny, 1984) et par l'unicité du métamorphisme thermique qui auréole l'ensemble des intrusions (de Rosen, 1965 a et b; Feybesse, 1984; Monier et Tegyey, 1985). Dans ces conditions, il est fort improbable que la pression de mise en place du granite des Colettes, au niveau où on l'observe actuellement, ait été bien différente — et, en tous cas, ait été supérieure — à la pression maximale estimée pour la formation du stockwerk (1 200 bars). A cette pression, le solidus d'un granite peraluminieux « normal » se situe à 710 °C. Compte tenu de ses teneurs en lithium ($Li_2O \leq 500$ ppm) et fluor ($F \leq 2\,200$ ppm), on peut estimer à 680-700 °C la température solidus des Colettes.

Dans la zone du stockwerk de la Bosse, le métamorphisme thermique des micaschistes, pénécontemporain de l'intrusion du granite des Colettes, est caractérisé par l'association minérale biotite-andalousite-cordiérite-muscovite (de Rosen, 1965 a et b; Feybesse, 1984; Monier et Tegyey, 1985), ce qui correspond à une température de l'ordre de 500 à 600 °C. Au contact immédiat du granite, de Rosen (1965 a et b) a observé dans les micaschistes l'apparition locale de filonnets et plages irrégulières granitiques à bords peu nets, associés à des accumulations de restites (cordiérite, sillimanite, andalousite). Cette description correspond exactement à une fusion partielle des micaschistes. Certes, le taux de fusion est faible et le volume affecté, minime. Le phénomène n'en existe pas moins et — pour un simple problème de bilan de chaleur — implique bien une température très élevée du granite lors de sa mise en place et une température initiale importante des micaschistes.

On retiendra finalement les paramètres suivants :

— corps granitique des Colettes assimilé à un cylindre de 4 km de diamètre moyen, sur une profondeur de 2 à 3 km (ce dernier paramètre n'est pas critique), (Vigneresse et al., 1984; Cuney, 1984),

— température de mise en place du granite : 680 à 700 °C,

— température initiale des micaschistes du stockwerk de la Bosse : 500 à 600 °C,

— distance du contact du granite aux zones échantillonées du stockwerk de la Bosse : 50 à 150 m.

Les autres données nécessaires, dont les valeurs sont couramment admises, sont (Clark, 1966) :

- conductivité thermique des micaschistes : 0,02 à 0,04 J. cm⁻¹ sec. $^{-1}$ °C $^{-1}$;
- densité moyenne : 2,7 ;
- chaleur spécifique : 1 J. g⁻¹.

Dans le cas qui nous intéresse, on peut négliger les différences des propriétés thermiques du granite et de l'encaissant (Jaeger, 1964).

La température maximum - la seule qui nous intéresse ici - atteinte par les échantillons du stockwerk a été calculée par la méthode de Jaeger (1959, 1964), d'après la théorie de Lovering (1955). Le résultat conduit à la fourchette relativement étroite 560-620 °C. Ces valeurs ont été utilisées plus haut pour déterminer la pression minimum de formation du stockwerk de la Bosse.

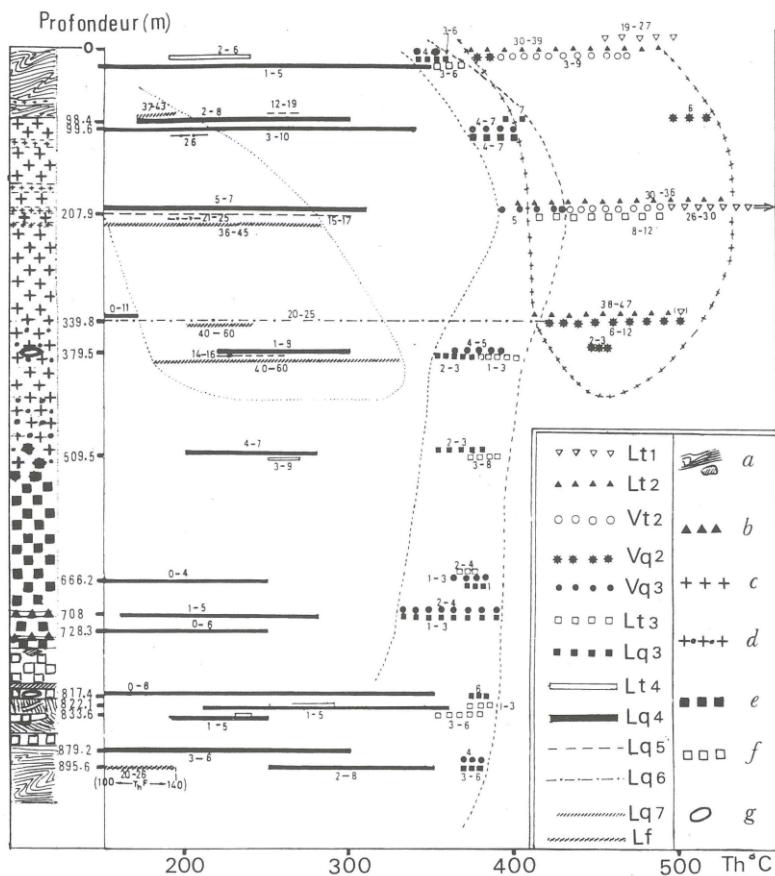


Fig. 4. — Principaux caractères microthermométriques des fluides du granite de Beauvoir.

Les nombres en petits caractères indiquent les gammes de salinité (en % pds eq. NaCl). Th : température d'homogénéisation $L + V = L$ ou V . Lt 1 : fluide précoce très salé, Th > 450 °C, 20-30 % pds eq. NaCl. Lt 2 : saumures précoces sursaturées, Th > 350 °C, 30-50 % pds eq. NaCl. Vt 2, Vq 2 et Vq 3 : vapeurs peu denses, Th > 340 °C, 1-12 % pds eq. NaCl. Lt 3 et Lq 3 : liquide peu dense, Th > 340 °C, 1-12 % pds eq. NaCl. Lt 4 et Lq 4 : liquides peu salés, Th < 350, 0-11 % pds eq. NaCl. Lq 5 : liquides assez salés, Th < 300 °C 12-19 % pds eq. NaCl. Lq 6 : liquides très salés, 20-26 % pds eq. NaCl. Lq 7 : saumures tardives sursaturées, Th < 330 °C, 35-60 % pds eq. NaCl. Lf : liquides très salés dans la fluorine, 20-26 % pds NaCl, 100 < Th < 140 °C. t = topaze, q = quartz, f = fluorine. Lithofaciès : a = micaschistes avec filons de quartz (« stockwerk »); b = microgranites; c = granite B 1 avec passées riches en lépidolite, à grain plus fin; d = granite B 1 riche en phosphates; e = granite B 2; f = granite B 3; g = enclaves.

Major microthermometry results of the fluids from the Beauvoir granite. The numbers in small figures are the salinities (in wt % NaCl). Th : homogenization temperature $L + V = L$ or V . Lt 1 = very saline early fluid, Th > 450 °C, 20 = 30 wt % eq. NaCl. Lt 2 = early brines, Th > 350 °C, 30-50 wt % eq NaCl. Vt 2, Vq 2, Vq 3 = low density vapours, Th > 340 °C, 1-12 wt % eq NaCl. Lt 3 and Lq 3 = low density liquids, Th > 340 °C, 1-12 wt % eq NaCl. Lt 4 and Lq 4 = low salinity liquids, Th < 350 °C, 0-11 wt % eq NaCl. Lq 5 = moderately saline fluids, Th < 400 °C, 20-26 wt % eq NaCl. Lq 7 = super saturated brines, Th < 330 °C, 35-60 wt % eq NaCl. Lf = very saline fluids in fluorite, Th between 100 and 140 °C, 20-26 wt % eq NaCl.

t = topaz, q = quartz, f = fluorite.
Lithofacies — a = micaschists with quartz veins (« stockwerk »); b = microgranites; c = Beauvoir granite B 1, with lepidolite rich zones; d = Beauvoir granite B 1, enriched with phosphates; e = Beauvoir granite B 2; f = Beauvoir granite B 3; g = solid inclusions in granite.

3. — Le granite de Beauvoir

3-a. — Fluides précoce

3-a-1. — Caractères généraux

Ces fluides se rencontrent exclusivement dans le quartz (Lq et Vq) et la topaze (Lt et Vt) du faciès B1, ainsi que dans la topaze de la partie supérieure du stockwerk.

Trois types essentiels ont été définis (fig. 4).

— Saumures Lt1 à 25-30 % pds eq. NaCl, homogénéisant en phase liquide entre 490 et 590 °C. Des fluides semblables caractérisent la topaze de la partie supérieure du stockwerk : ils sont un peu moins salés (20-27 % pds eq. NaCl) et un peu plus « froids » (Th entre 450 et 500 °C).

— Saumures Lt2 extrêmement salées (30 à 50 % pds eq. NaCl), homogénéisant entre 400 et 520 °C en phase liquide. Des fluides semblables, homogénéisant un peu plus bas (350-500 °C) sont communs dans la topaze du stockwerk (partie supérieure).

— Vapeurs aqueuses Vt2, associées aux saumures Lt2 et apparemment contemporaines de ces dernières. Elles sont parfois assez salées (de 3 à 12 % pds eq. NaCl) et homogénéisent en phase vapeur entre 400 et 520 °C. Des vapeurs tout à fait analogues (3-9 % pds eq. NaCl, Th entre 375 et 470 °C) sont bien représentées dans la topaze du stockwerk (partie supérieure).

Il existe donc, pour chacun des trois types de fluides décrits ci-dessus, une analogie remarquable entre leurs occurrences dans le granite B1 d'une part, et dans la topaze de la partie supérieure du stockwerk de la Bosse d'autre part ; tout au plus peut-on noter des températures et parfois des salinités un peu plus basses pour les derniers. La conclusion que l'on peut en tirer est immédiate : les fluides piégés dans la topaze du stockwerk correspondent à l'hydrothermalisme précoce du granite de Beauvoir. La différence de température, qui concerne plus spécialement les fluides salés Lt1, s'explique aisément par un gradient de température entre le granite et son encaissant (stockwerk), donc un refroidissement des fluides qui s'échappent du granite.

3-a-2. — Origine des saumures Lt1 et conditions de mise en place du granite B1

Certaines inclusions contenant les saumures Lt1 homogénéisent jusqu'à 590 °C. Compte tenu d'éventuelles corrections de pression, on peut estimer à 590-620 °C les conditions de piégeage. D'après les études expérimentales effectuées sur la fusion du granite de Beauvoir, le solidus de ce granite serait compris entre 560 et 580 °C, à $P_{H_2O} = P_{\text{totale}} = 1 \text{ kbar}$ (Pichavant et al., ce volume). La comparaison de ces deux gammes de températures indique bien le caractère magmatique des saumures Lt1, et donc le caractère très précoce de ces dernières.

Au moment de leur piégeage, les saumures Lt1 ne montrent aucun indice d'ébullition. En raisonnant sur le système $H_2O-NaCl$, il est facile de fixer une pression minimale de piégeage (et donc de mise en place du granite B1) par intersection du solidus du granite par la limite du domaine d'immiscibilité fluide (liquide + vapeur) pour les saumures en question

(26-28 % pds eq. NaCl). On aboutit ainsi à une pression fluide minimale de 800 bars (fig. 5). Il serait invraisemblable que la pression de confinement lors de la mise en place de Beauvoir soit supérieure à celle du granite des Colettes, qui l'a précédé de peu (1 000-1 200 bars). Une fourchette de 800 à 1 000 bars paraît donc convenable pour la pression de mise en place du granite de Beauvoir.

Une autre estimation (théoriquement plus précise) de cette pression de mise en place de Beauvoir peut être effectuée en intersectant le solidus du granite par les isochores, malheureusement pas très précis dans les domaines de salinité et des hautes valeurs de Th des saumures Lt1. On aboutit pourtant ainsi à des valeurs de l'ordre de 850 à 1 000 bars (fig. 5).

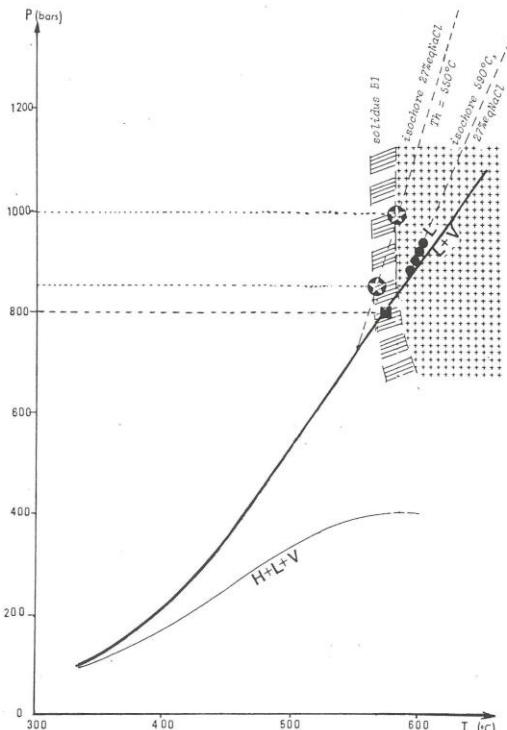


Fig. 5. — Estimation des conditions de piégeage des saumures précoce Lt1 du granite B1 et des conditions (T, P) de mise en place de ce granite. Les croix représentent le domaine liquide silicate + cristaux (+vapeur) du granite B1. Cercles pleins = conditions probables de piégeage des saumures Lt1 les plus précoce. Étoiles = conditions de mise en place de B1 par intersection de l'isochore moyen des saumures Lt1 et du solidus B1. Carré = condition de pression minimale de mise en place de B1 par intersection du solidus de B1 et de la limite d'immiscibilité $L = L + V$ pour la composition (~ 27 % pds eq. NaCl) des saumures Lt1.

Entrapment conditions of the early magmatic saline fluids Lt1 and (T, P) conditions of emplacement of the Beauvoir granite B1. Crosses = liquid silicate + crystals + vapours. Solid circles = likely (T, P) conditions of entrapment of the earliest Lt1 fluids. Stars = estimate of the (T, P) conditions of emplacement of the B1 granite, by intercepting the mean isochore of the fluids Lt1 and the solidus of the granite. Square = minimum pressure of the (P, T) conditions for the emplacement of B1, estimated by intercepting the solidus of B1 and the immiscibility boundary $L = L + V$ corresponding to the mean salinity of the Lt1 fluids (27 wt % eq. NaCl).

Ces pressions sont parfaitement réalistes ; pourtant leur signification doit être discutée. Tout d'abord, il faut rappeler que les fluides dont il est question ici sont plus complexes que le système simple $H_2O-NaCl$: présence probable du potassium (qui ne devrait pas changer énormément l'estimation) mais aussi d'autres solutés, en quantités suffisantes pour abaisser le premier eutectique à des températures inférieures à $-60^\circ C$. Le calcium et/ou le magnésium pourraient être responsables de ce comportement. Mais leur teneur devrait être significative, ce qui, pour un fluide à l'équilibre avec le magma très spécialisé et différencié du granite B1, est irréaliste. D'autres éléments plus « normaux » dans ce contexte géochimique pourraient jouer un rôle essentiel : lithium, fer, fluor. Par exemple, l'eutectique $LiCl-H_2O$ se situe à $-75^\circ C$, ce qui compte tenu des teneurs en $NaCl$, correspond bien aux valeurs mesurées. Toutefois, et malgré les faibles valeurs de ses rayons ioniques, le lithium est un « alcalin léger » ; sa présence dans le système (en proportions pas trop fortes par rapport au sodium) ne perturbe pratiquement pas les propriétés physiques des fluides à hautes températures (propriétés PVTX, limite des domaines d'immiscibilité) (Zhang et Weisbrod, 1987).

Un autre aspect concerne la signification même de cette pression. Lors des phases terminales de la cristallisation du granite, le fluide salé est donc « expulsé » du magma. Dans cette situation, le système est univariant, ce qui signifie que la pression fluide est déterminée à une température donnée. Si le toit schisteux est peu perméable, un léger refroidissement ultérieur va, compte tenu de la pente fortement négative du solidus, augmenter cette pression, qui va dès lors dépasser la pression de confinement (Burnham, 1979). Cette « surpression fluide » ne peut probablement pas excéder 100 ou 200 bars, valeurs au-delà desquelles une fissuration fracturation

hydraulique va se produire (Norton, 1984 ; Koide & Bhattacharji, 1975). En d'autres termes, la pression estimée à 800-1 000 bars correspond à cette pression maximale. La pression de confinement (\sim lithostatique) lors de la mise en place du granite B1 est donc plus proche de 800 bars, ce qui correspond à une profondeur de l'ordre de 3 000 mètres.

Selon Jacquot et Gagny (1985) (ce volume), l'étude structurale indiquerait un quasi-synchronisme des intrusions de Colettes et de Beauvoir. Ceci implique une pression de confinement identique pour les deux intrusions, alors que nos estimations donnent en moyenne 300 bars de moins (soit environ 1 100 m de moins) pour Beauvoir que pour Colettes. Toutefois, compte tenu des incertitudes qui pèsent sur ces estimations, cette différence n'est pas forcément significative.

3-a-3. — Ébullition précoce des fluides magmatiques du granite B1

Les principales caractéristiques des fluides aqueux précoce du granite B1 et de la topaze du stockwerk (partie supérieure) ont été reportées sur le diagramme TX du système $H_2O-NaCl$ (fig. 6 a et b). On constate en particulier que les saumures très salées Lt2, et les vapeurs aqueuses « chaudes » Vt2 et Vq2 homogénéisent dans les mêmes gammes de température ($520-400^\circ C$ dans le granite, $490-350^\circ C$ dans la partie supérieure du stockwerk) et de pression (700-200 bars dans le granite, 490-120 bars dans le stockwerk).

Cette particularité est tout à fait symptomatique d'un équilibre entre un liquide salé dense et une vapeur peu salée

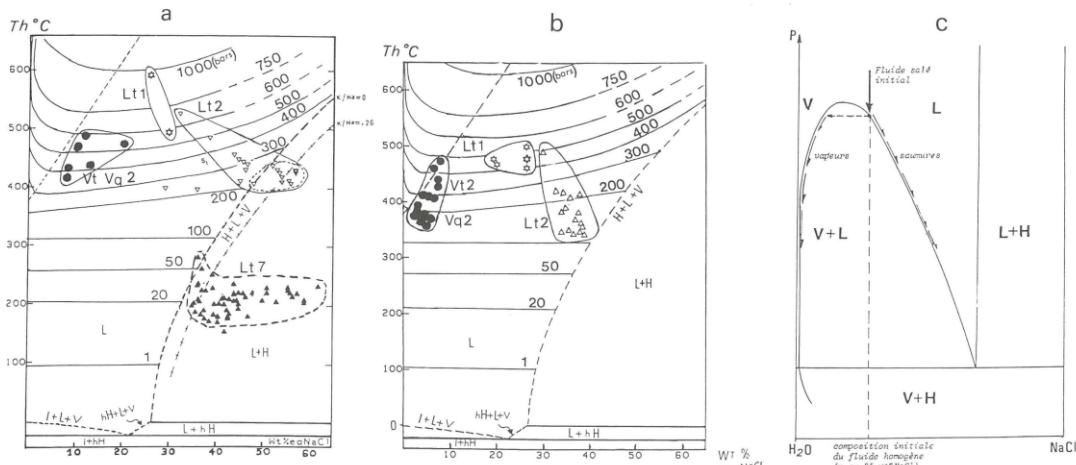


Fig. 6. — Caractéristiques physico-chimiques des fluides du granite B1.
6a = inclusions dans B1 ; 6b = inclusions dans le stockwerk (partie supérieure). Étoiles = saumures précoces Lt1 ; cercles = « vapeurs » Vt2 et Vq2 résultant de la démixtion de Lt1 ; triangles vides = saumures supersalées Lt2 résultant de la démixtion de Lt1 ; les plus froides (domaine limité par un pointillé fin, fig. 6a) contiennent à $200^\circ C$, outre la halite, de la sylvite. Triangles pleins = saumures sodico-potassiques tardives Lq7. La fig. 6c schématisse le mécanisme de démixtion (« ébullition ») des saumures précoces Lt1 en saumures supersalées Lt2 et « vapeurs » Vt2 peu salées. On comprend en particulier pourquoi il y a évolution continue des compositions entre Lt1 et Lt2, et discontinuité de ces compositions entre Lt1 et les vapeurs.

Physical and chemical features of the fluids from the Beauvoir granite B1
6a = fluid inclusions from B1, 6b = fluid inclusions from the upper stockwerk ; stars = early saline fluids Lt1 ; circles = vapours Vt2 and Vq2, generated by unmixing of Lt1 ; empty triangles = very saline brines Lt2, generated by unmixing of Lt1 ; the coldest of these brines Lt2 (domain encircled by a thin dotted line, fig. 6a), at $200^\circ C$, contain halite and sylvite. Solid triangles = late Na - K rich brines Lq7.
The fig. 6c explains the fluid immiscibility process of the early fluids Lt1 into supersaturated brines Lt2 and low-salinity vapours Vt2 - Vq2 ; this figure also shows why there is a continuous evolution between Lt1 and Lt2, and a compositional gap between Lt1 and Vt2-Vq2.

et peu dense, autrement dit d'un phénomène d'immiscibilité en phase fluide (Pichavant et al., 1982 ; Ramboz et al., 1982). Dans ce cas, les températures et pression d'homogénéisation donnent directement les conditions thermobarométriques de la démixtion. Dans le granite B1, elle débute vers 520 °C, 650-700 bars et se termine vers 400 °C, 200 bars. Le phénomène est identique dans la partie supérieure du stockwerk, avec des températures (490 → 350 °C) et des pressions (490 → 120 bars) un peu plus faibles.

On remarque aussi que les compositions des vapeurs Vt2-Vq2 et des saumures Lt2 encadrent la composition des liquides salés Lt1. En outre, on note une nette évolution TPX des saumures Lt2, qui s'enracinent pratiquement dans le domaine des saumures Lt1, et évoluent par augmentation de salinité à température et pressions décroissantes. Les vapeurs montrent une tendance opposée (diminution de la salinité à température et pression décroissantes) qui, elle, ne s'enracine pas dans les liquides Lt1. L'ensemble de ces faits constitue une forte présomption en faveur de l'hypothèse selon laquelle les vapeurs Vt2-Vq2 et les saumures Lt2 proviendraient simplement de la démixtion - on peut alors parler ici d'ébullition - du fluide (liquide) salé Lt1, qui lui-même vient d'être expulsé du granite B1, confirmant ainsi son caractère très précoce. Le schéma explicatif simplifié de ce processus est résumé sur une projection PX (fig. 6c).

Le fait que le fluide salé précoce Lt1 et le phénomène d'ébullition qui le démixte en deux phases distinctes sont propres au granite B1, est attesté par l'occurrence de ces 3 fluides dans ce seul faciès B1 (ainsi que dans le stockwerk supérieur), à l'exclusion totale des faciès B2 et B3, ainsi que le stockwerk du bas (fig. 4).

L'évolution thermobarométrique globale de l'ébullition est reportée sur la figure 7 : le trajet moyen décompression-refroidissement est bien « calé » sur une courbe très proche des courbes de décompression adiabatique de fluides aqueux riches en sels (Toulmin and Clark, 1967).

D'une façon générale, dans le système H₂O-chlorures, la cause essentielle de démixtion d'un fluide initialement homogène est une chute de pression. Dans le cas qui nous intéresse ici, cette chute brutale de pression ne peut en aucun cas résulter d'une remontée de l'ensemble du bâti. On a vu plus haut que, à la suite de l'expulsion des fluides hors du magma lors de la fin de cristallisation de celui-ci, une surpression fluide temporaire a dû s'établir. Cette surpression a entraîné une fracturation hydraulique, ouvrant des fissures qui se sont propagées surtout vers le haut. Une conséquence essentielle de ces événements est le passage très rapide, pour les fluides, d'un régime de pression lithostatique à un régime de pression hydrostatique. Dans le granite B1, la pression initiale (voir plus haut) est de l'ordre de 800 bars, la pression finale de l'ordre de 200 bars. Les trois types de fluides précoce envoient le stockwerk un peu plus tard, à des températures et des pressions un peu plus basses que dans le granite, avec des pressions initiales de l'ordre de 600 à 500 bars et une brusque chute jusqu'à 100 bars.

On note que la chute de pression est plus importante que celle que l'on peut prévoir pour un liquide homogène de densité normale (60 à 70 % de la pression lithostatique). En réalité, le fluide est hétérogène et est constitué d'une part importante de vapeur. Ceci a pour effet de diminuer considérablement sa densité globale, ce qui permet les chutes de pression constatées, de l'ordre de 75 à 80 % de la pression initiale.

Les trajets TPX de l'ébullition peuvent être divers, comme on le constate en partie sur la figure 7. Une décompression relativement brutale peut amener les saumures à la saturation en NaCl. Si ces saumures saturées, en train de bouillir, restent suffisamment longtemps dans cette situation, la saturation peut même se produire par rapport à KC1. Ce type d'évolution est magnifiquement représenté dans les échantillons 339,8 et 379,5 dont les topazes renferment de telles inclusions liquides hypersalées à cristaux de halite à laquelle s'ajoute aux plus basses températures, la sylvite (fig. 6a).

Remarques sur l'évolution des fluides précoce du granite B1

Dans le détail, l'évolution des fluides précoce apparaît beaucoup plus complexe que ne le suggère l'évolution décrite ci-dessus. Les détails de cette évolution ne peuvent guère être mesurés, et on se contentera de donner quelques faits.

- Les régimes de circulation dans les fissures nouvellement ouvertes sont très variés et, d'une fissure à l'autre, la rapidité de la chute de pression peut aussi varier considérablement (Drummond, 1981). C'est sans doute ainsi que l'on peut

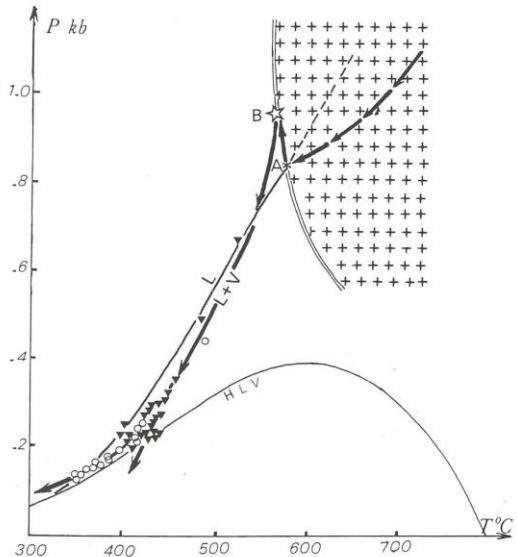


Fig. 7. — Évolution thermobarométrique des saumures Lt2 du granite B1. Croix = domaine liquide + cristaux + vapeur du B1 ; double ligne = solides du B1. Ligne continue épaisse = limite d'immiscibilité $L = L + V$ pour les saumures précoce (~ 25 à 27 % pds eq. NaCl). Triangles = fluides dans le granite B1 ; cercles = fluides du stockwerk (partie supérieure). Les flèches indiquent l'évolution thermo-barométrique. La partie AB du trajet correspond à la surpression fluide, due à la fin de la cristallisation de B1 ; cette surpression se résoud par fracturation hydraulique au point B.

Temperature and pressure evolution of the brines from the granite B1. Crosses = liquid silicate + crystals + vapour. Double line = solidus of the granite B1. Heavy solid line = immiscibility boundary for a 27 wt% eq NaCl fluid (average composition of the Lt1 fluid). Triangles = fluids from the granite B1 ; circles = fluids from the upper stockwerk. The arrows indicate the (T,P) evolution of those fluids. The path AB is related to the temporary fluid overpressure, at the end of the crystallization of granite B1. This overpressure is resolved by hydraulic fracturing at point B.

observer, jusqu'à des pressions de l'ordre de 500 à 600 bars, des fluides salés précoce qui ont été préservés (en général temporairement) de la démixtion. Un autre type de trajet possible durant l'ébullition, qui concerne surtout les vapeurs, mais aussi les saumures, entraîne les fluides hors du domaine biphasé L + V. Ceci a pour conséquence la fin de l'ébullition des saumures, et la possibilité, pour la vapeur de se condenser (Weisbrod et Poty, 1975). Un tel trajet, sans doute dû à des chutes de pression moins brutales que dans le cas précédent, est bien représenté dans la partie supérieure du stockwerk (fig. 7) mais aussi dans quelques échantillons du granite (Ech. 98,4 et 207,9).

- Il est probable que, au cours de son ascension, les deux phasés (vapeurs Vt 2-Vq 2 et saumures Lt 2 extrêmement salées) se séparent complètement, et voyagent ensuite pour leur propre compte (Drummond, 1981). Ceci va se traduire par des associations dans un même échantillon, de liquides salés et de vapeurs, dont une partie au moins peut ne pas être à l'équilibre les uns avec les autres. On explique ainsi les petits décalages de températures d'homogénéisation, de pressions et de compositions.
- On constate localement une dilution relativement précoce et « chaude » (420-490 °C) des saumures, telle qu'on peut l'observer au niveau 207,9 (liquides à 8-20 % pds eq. NaCl). Cette dilution résulte vraisemblablement du mélange des saumures avec des fluides aqueux extérieurs qui envahissent progressivement le système (Delaney, 1982).

3-b. — Fluides de la gamme 350-400 °C (Lt3 Vq3 Lq3)

3-b-1. — Caractères généraux et évolution (T.P)

Ces fluides essentiellement aqueux sont très bien définis par leur gamme de températures d'homogénéisation (entre 330 et 420 °C), de salinité constante (entre 1 et 8 % pds eq. NaCl) et de densité plutôt faible (entre 0,60 et 0,75). On les rencontre dans le quartz et la topaze de pratiquement toute la série, depuis la partie inférieure du stockwerk jusqu'à sa partie supérieure, en passant par tous les faciès du granite de Beauvoir. On note que les températures moyennes d'homogénéisation, (tantôt en phase liquide, tantôt en phase vapeur), augmentent régulièrement depuis la base (330-340 °C) jusqu'au milieu du faciès B1, où elles passent par un maximum (390-430 °C) pour diminuer vers le haut et atteindre 330-350 °C dans la partie supérieure du stockwerk (fig. 4).

On a retenu, à chaque niveau échantillonné, la température d'homogénéisation moyenne. La teneur moyenne en sel, pratiquement invariable est de 3,5 à 4 % pds. Les densités correspondantes ayant été déterminées à partir de ces valeurs, elles ont été lissées par régressions polynomiales (coefficients de régression supérieurs à 0,99). On a vu que la profondeur estimée, au niveau du sommet du granite de Beauvoir, était, lors de sa mise en place de l'ordre de 3 000 mètres. Si l'on néglige un éventuelle (faible) remontée générale du bâti, on peut garder cette valeur lors des circulations des « fluides de la gamme 350-400 °C » :

$$\text{entre } 3\ 900 \text{ et } 3\ 210 \text{ m} : \varrho = -5,43 \times 10^{-11} h^3 + 8,84 \times 10^{-7} h^2 - 0,004 h + 6,127$$

$$\text{entre } 3\ 210 \text{ et } 3\ 000 \text{ m} : \varrho = 2,66 \times 10^{-6} h^2 - 0,01708 h + 28,02$$

[ϱ et h sont respectivement la densité (g cm^{-3}) et la profondeur (m)]

Les rapports entre les deux polynômes se font à tangente commune. Bien entendu, on ne dispose pas de données entre 3 000 et la surface réelle de l'époque. La relation choisie $\varrho = f(h)$ tient compte essentiellement d'un raccord parfait avec celle retenue pour le domaine 3 000-3 210 m, ainsi que de la limite $\varrho = 1$ pour $h = 0$. La répartition des densités ainsi calculée est tout à fait acceptable entre 0 et 3 000 m :

$$\text{entre } 0 \text{ et } 3\ 000 : \varrho = 1 - 4,281 \times 10^{-42} h^{11,7386}$$

D'autres tracés moins contraints ont été testés : ils donnent des résultats pratiquement identiques.

La répartition densité-profondeur ainsi lissée est représentée dans la figure 8a. La répartition pression-profondeur se calcule ensuite facilement en intégrant l'équation différentielle :

$$P_2 - P_1 = 0,1 \int_{h_1}^{h_2} \varrho(h) dh$$

(P en bars, h en mètres)

Il est ensuite aisément d'estimer la température de piégeage, donc de circulation.

Profondeur sondage (m)	0	100	210	380	510	666	708	825	896
Profondeur réelle estimée (m)	3 000	3 100	3 210	3 380	3 510	3 666	3 708	3 825	3 896
Pression fluide (bars)	293	302	310	320	328	340	343	351	357
Température de piégeage (T°C)	355	380	410	400	390	380	375	360	350

Le trajet (T,P) des fluides est indiqué sur la figure 8b. On voit que partant du bas du sondage, à une température moyenne de 360 °C et une pression fluide de 360 bars, la pression fluide ne cesse de diminuer. Par contre, la température de ces fluides augmente jusqu'au cœur du granite B1, pour diminuer au-dessus.

3-b-2. — Interprétation

1ère hypothèse. Ces fluides seraient originaires du granite B2. Puisqu'ils sont trouvés dans le granite B1, cela impliquerait que ce dernier est antérieur au B2. Trois arguments majeurs permettent d'éliminer cette hypothèse :

- les températures calculées sont beaucoup trop faibles pour que les fluides puissent dériver du granite B2 (à moins de faire appel à d'énormes pressions, totalement irréalistes).
- dans cette hypothèse, le granite B2 serait forcément plus chaud que le granite B1, et on n'observerait pas la tendance profondeur-température (cette dernière maximale dans le B1) que l'on constate.
- les relations structurales entre B1 et B2 (Gagny, comm. orale) indiquent une antériorité de B2 par rapport à B1.

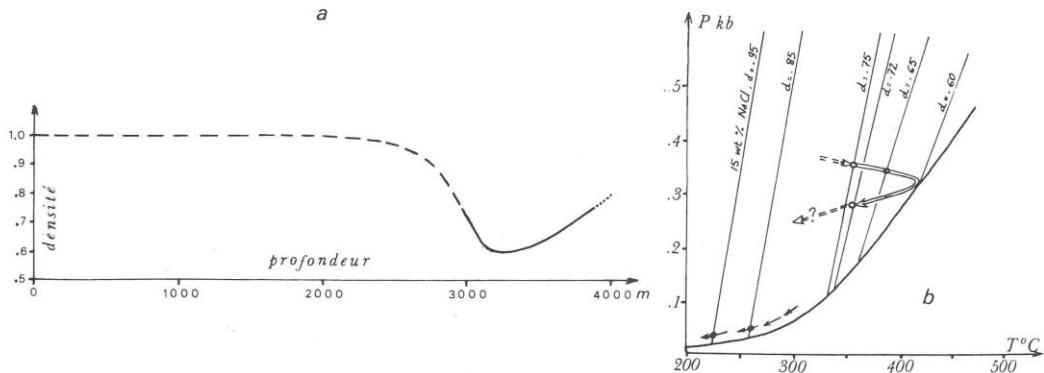


Fig. 8. — Évolution thermobarométrique des fluides de la gamme « 350-400 °C » et des fluides tardifs.
8a : Répartition de la densité des fluides de la gamme 350-400 °C en fonction de la profondeur. 8b : Ligne continue épaisse : limite d'immiscibilité $L = L + V$ pour des fluides aqueux à 3,5-4 % eq. pds. NaCl. Lignes continues minces = isochores (tous les isochores se rapportent à des fluides à 3,5-4 % eq. NaCl sauf indication contraire) ; les nombres associés indiquent les densités. Les évolutions de piégeage sont indiquées par des cercles (fluides « 350-400 °C ») et des points (fluides tardifs).

Temperature and pressure evolution of the fluids of the « 350-400 °C range »
8a : smoothed distribution of the fluid densities versus depth – 8b : heavy solid line = immiscibility boundary $L = L + V$ for aqueous fluids with 3,5 – 4 wt % eq NaCl. Thin solid lines = isochores for fluids with 3,5 – 4 wt % NaCl, unless otherwise specified. The associated numbers indicate the densities. Circles (fluids of the « 350-400 °C range ») and dots (late fluids) indicate some of the conditions of entrapment.

2ème hypothèse. Ces fluides constituerait la suite de l'évolution des fluides du B1. Cette hypothèse peut être éliminée : les fluides précoce du B1 ont des caractères bien différents (liquides très salés), et s'échappant vers le haut, n'ont guère la possibilité de circuler dans le B2. Par contre, compte tenu de ce qui suit, il est très possible que ces fluides aqueux très peu salés aient été en grande partie responsables de la dilution des saumures précoce (Lt1 et Lt2) du granite B1.

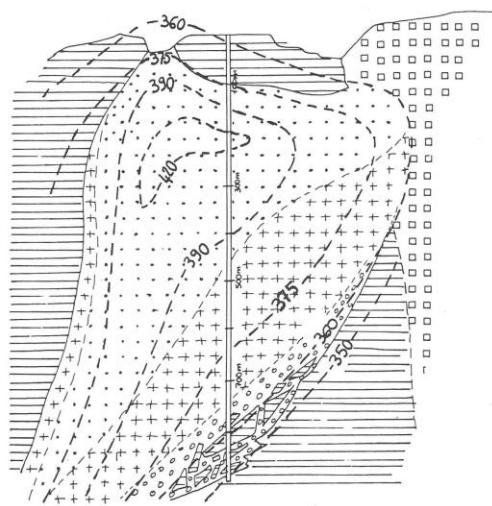


Fig. 9. — Régime thermique du site d'Échassière lors de la circulation des fluides de la gamme « 350-400 °C ».
Le tracé des isothermes (lignes interrompues épaisses ; températures en °C) est très largement hypothétique, sauf à leur intersection avec le sondage, où les températures ont été calculées (voir texte). Hachures horizontales : micaschistes, stockwerk ; points : granites B1 ; croix : granite B2 ; cercles : granite B3 ; carrés : granite des Colettes. Contours géologiques d'après Cuney et al. (1986), modifié.

Distribution of the isotherms during the circulation of the fluids of the « 350-400 °C range »

The location of the isotherms is only tentative (heavy dashed lines, temperature in Celsius) except along the drilling, where the temperatures have been calculated (see text). Hatched area = micaschists, stockwork ; dots = Beauvoir granite B1 ; crosses = Beauvoir granite B2 ; circles = Beauvoir granite B3. Squares = Colettes granite. Geology from Cuney et al. (1986), modified.

minée : les fluides précoce du B1 ont des caractères bien différents (liquides très salés), et s'échappant vers le haut, n'ont guère la possibilité de circuler dans le B2. Par contre, compte tenu de ce qui suit, il est très possible que ces fluides aqueux très peu salés aient été en grande partie responsables de la dilution des saumures précoce (Lt1 et Lt2) du granite B1.

Finalement, puisque ces fluides ne proviennent pas du granite de Beauvoir, ils ne peuvent provenir que de l'encaissant. Ce fait, ainsi que leur régime thermique, indique l'invasion, à ce stade d'évolution du système, de fluides extérieurs de température modérée, qui circulent de bas en haut dans la masse granitique suffisamment refroidie. Ces fluides se rechargeant par le bas du système, à des températures inférieures à 350 °C. Lorsqu'ils pénètrent le granite B2, ils continuent à se réchauffer, jusqu'au maximum thermique au cœur du granite B1. La suite du trajet s'effectue bien entendu à température décroissante. Le fonctionnement global de ce système convectif, schématisé sur la figure 9, est possible grâce à un réseau de fractures permettant la circulation des fluides aqueux et à la source d'énergie que constitue le centre encore chaud du granite de Beauvoir.

4. — Fluides tardifs dans le Beauvoir

4-1. — Caractères généraux et types de fluides

Quatre types de fluides ont été distingués (fig. 4) :

- fluides peu salés (Lt4 et Lq4) (0-10 % pds eq. NaCl), homogénéisant entre 120 et 350 °C ; ils sont très répandus et abondants,

- fluides modérément salés (Lq 5) (12-19 % pds eq. NaCl), homogénéisant entre 120 et 300 °C; ils sont peu communs, sauf dans l'échantillon Ech. 207,9,
- fluides très salés (Lq 6) (20-26 % pds eq. NaCl), homogénéisant vers 200 °C, sauf dans l'échantillon Ech 339,8, où ils homogénéisent entre 130 et 420 °C,
- saumures sodico-potassiques extrêmement salées (Lq 7) (40 à 60 % pds eq. NaCl), homogénéisant dans une gamme de 75 °C de part et d'autre d'une moyenne qui décroît depuis la profondeur (225 °C à 379,5 m) jusqu'à la surface (180 °C à 98,38 m) (fig. 6a).

4-2. — Saumures extrêmement salées (Lq7)

Elles sont strictement localisées dans le granite B1 et pourraient représenter la fin de l'évolution des saumures précoce.

Sur un diagramme salinité-Th, les points représentatifs de ces saumures sont situés, pour l'essentiel, dans le domaine « sursaturé » en sel (liquide + cristal) où ils s'organisent en tendance montrant une forte dispersion des compositions, mais une gamme étroite de températures d'homogénéisation.

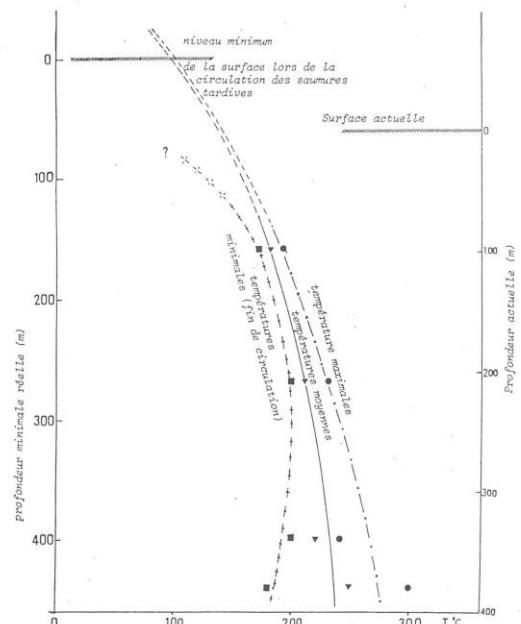


Fig. 10. — Régime thermique du site d'Échassières lors de la circulation des saumures tardives du B1
Carrés = températures minima ; triangles = températures moyennes ; cercles = températures maxima.
Distribution of the temperatures during the circulation of the late brines in the Beauvoir granite B1
Temperatures minimum (squares), average (triangles), maximum (circles).

Cette tendance atteint toujours la courbe de sursaturation liquide + vapeur + cristal (ou cristaux). L'ensemble de cette configuration est tout à fait typique d'un fluide, saturé en sel(s) et soumis à une ébullition : La grande dispersion en composition, résulte simplement du piégeage hétérogène, dans les inclusions, de cristaux de sels de taille variable (fig. 6a) (Weisbrod, 1981, 1982, 1984).

Puisqu'il y a ébullition, la température d'homogénéisation correspond à la température de piégeage ; comme en outre le système est univariant, on a déduit immédiatement la pression de piégeage :

Niveau actuel	Température °C	Pression moyenne (bars)
98,38	170-(180)-190	10-(12)-16
207,93	200-(210)-230	20-(25)-35
339,8	200-(220)-240	20-(29)-42
379,5	180-(250)-300	12-(48)-96

La figure 10 montre les relations températures d'ébullition-profondeur. Quoique les données soient très peu nombreuses, une grossière extrapolation des courbes vers le haut conduit, pour une ébullition à 100 °C (≈ 1 bar) à une profondeur minimale de + 60 mètres. En d'autres termes, le niveau actuel ne serait que 60 mètres plus bas que la surface lors de la circulation des saumures tardives. La densité moyenne globale calculée est de 1,1, valeur tout à fait raisonnable pour un mélange mécanique de saumures extrêmement salées ($\approx 1,5$) et de vapeurs associées. Bien entendu, en raison de la faible profondeur, ces vapeurs s'évacuent facilement, et c'est la raison pour laquelle, dans ce type d'environnement, on ne les trouve pratiquement jamais piégées dans des inclusions (Weisbrod, 1981, 1982, 1984).

Lors de la circulation des « fluides de la gamme 350-400 °C », on a vu que la profondeur au niveau du stockwerk supérieur était de l'ordre de 3 000 m. Le régime de pression fluide reste hydrostatique et la chute de pression constatée ici ne peut que résulter du soulèvement du bâti et de son érosion, qui aurait affecté environ 2 900 m de couverture.

4-3. — Fluides très à moyenement salés (Lq5, Lq6)

Ils sont également strictement localisés dans le granite B1. Leur composition laisse à penser qu'ils résultent de mélanges, en proportions diverses, entre des saumures extrêmement salées, soit précoce, soit tardives, et des fluides extérieures aqueux.

Dans l'échantillon 895,6, on note un enrichissement en fluorine. Ce minéral a piégé des fluides aqueux très salés (20-26 % pds eq. NaCl) à des températures basses de 100 à 140 °C. Ces fluides font partie des fluides tardifs et froids qui ont rechargé le système de Beauvoir (surtout B 1 et B 3) où ils ont été légèrement réchauffés.

4-4. — Fluides aqueux peu salés (Lq4, Lt4)

Dans les micaschistes du haut du système, ces fluides font suite, vers les basses températures, aux « fluides de la gamme 350-400 °C ». De même, dans la partie inférieure du système, ils font suite, toujours vers les basses températures, aux premiers fluides de recharge du système (« fluides de la gamme 350-400 °C ») qu'ils reliaient en continuité. Cette évolution des fluides de « décharge » et de « recharge » du circuit convectif traduit bien le « vieillissement » par refroidissement de l'ensemble du système.

Pour les autres fluides aqueux peu salés, il est difficile de définir exactement leur rôle ; il est probable que certains d'entre eux participent aux ébullitions tardives de faible pression. D'une façon générale, il faut souligner qu'à ce stade la dynamique du système paraît fort complexe et n'a, pour l'instant, pas été abordée. Une étude détaillée des inclusions tardives dans les différentes générations de quartz filonien, en relation avec les altérations associées et leurs directions structurales, pourraient peut être permettre d'en éclaircir l'histoire.

5. — Fluides aquo-carbo-azotés (COHN) dans le granite de Beauvoir

5-1. — Enclaves dans le granite

Un petit nodule quartzeux, fortement recristallisé à sa bordure, a été observé en enclave dans le granite B1 au niveau 379,5. Ce nodule contient en inclusions les mêmes fluides - quoiqu'en moindre abondance - que ceux du granite de Beauvoir mais on y observe en outre quelques inclusions (localisées au cœur du nodule) dont la composition et la densité sont en tous points semblables à celles des inclusions COHN du stockwerk (fig. 2 et 3). L'ensemble de ces faits indique qu'il s'agit vraisemblablement d'un fragment de filon du stockwerk entraîné par le granite.

Une autre occurrence de ces inclusions COHN, également indiscernables en composition et densité de celles du stockwerk (fig. 2 et 3), a été observée dans les quartz d'un

microgranite au niveau 708,0. On est donc tenté de faire de ce microgranite une roche « ancienne », antérieure ou contemporaine à la formation du stockwerk dont elle a donc pu piéger les fluides, et qui se trouve maintenant enclavée dans le granite. Malheureusement, l'échantillon étudié ne permet pas de démontrer qu'il s'agit bien d'une enclave et il est vrai que cette hypothèse contredit l'interprétation structurale du contact microgranite-granite proposée par Gagny et Jacquot (1985). Toutefois, la présence en reliques blindées dans le quartz, de petits micas noirs très différents des micas de Beauvoir (Aïssa, 1987), ainsi que l'évolution cristallochimique des micas du microgranite (Fonteilles, comm. orale) conforte bien cette hypothèse, en accord avec des observations plus anciennes (Aubert, 1969).

5-2. — Inclusions COHN dans les topazes

Quelques rares inclusions à contenu aquo-carbo-azoté ont été observées dans certaines topazes du stockwerk, ainsi que dans quelques topazes automorphes du granite B2 (niveau 509,5 en particulier). Là encore, ces fluides sont identiques en tous points à ceux piégés dans le quartz du stockwerk (fig. 3 et 11, tabl. 1 et 2). Il est essentiel de souligner que la répartition de ces inclusions est extrêmement aléatoire, aussi bien à l'échelle du granite B2 qu'à celle de l'échantillon et à celle de la population des topazes primaires dans une lame mince. En outre, ces inclusions n'ont jamais été observées dans les quartz du B2 ni du B1.

Compte tenu de leur densité (fig. 11) et de leur pression de piégeage, certainement inférieure à 1 000 bars (voir plus haut), une bonne partie de ces inclusions aurait dû être piégée en conditions nettement subsolidus, entre 550 et 450 °C (fig. 11). Mais alors, on ne comprend pas pourquoi on ne les observe que dans quelques topazes, et jamais dans les quartz du granite.

L'ensemble de ces faits montre clairement que ces fluides ne peuvent en aucun cas être rattachés au granite de Beauvoir ni, a fortiori, à celui des Colettes. Pour les mêmes raisons, il est impossible d'en faire les témoins d'une circulation tardive de fluides aquo-carboniques. Finalement, une seule hypothèse a pu être retenue, qui prend en compte toutes les contraintes énumérées ci-dessus ; les inclusions COHN des topazes représenteraient le « recyclage » d'une partie des fluides COHN du stockwerk lors de l'intrusion du granite de Beauvoir. Il faut alors comprendre comment quel-

N° échantillon	Roche-hôte	Minéral-hôte	Microthermométrie			Rap. relatifs volatils			Composition globale (moles%)					Densité Globale	
			Vaq (vol.%)	Th°C	T _{FG}	T _{FC}	CO ₂ %	CH ₄ %	N ₂ %	H ₂ O	NaCl	CO ₂	CH ₄	N ₂	
66 d	Stockwerk sup.	topaze	55	364 L	-3,2	8,1	100	-	-	96,79	1,65	1,58	-	-	0,58
509,50	Granite 82	"	25	416 V	?	11,0	90	10	-	91,04	-	8,17	0,79	-	0,30
"	" "	"	40	394 L	?	9,0	88	12	0	99,38	-	0,57	0,05	-	0,42
"	" "	"	60	393 L	?	2,7	42	5	53	99,28	-	0,40	0,03	0,30	0,60
"	" "	"	25	403 V	?	8,6	46	7	47	84,52	-	7,39	1,05	7,04	0,33
"	" "	"	50	417 V	-5,4	11,1	86	14	-	95,96	2,71	1,20	0,13	-	0,53
"	" "	"	65	406 V	-4,4	9,1	55	7	38	95,22	2,21	1,69	0,14	0,74	0,65

Tabl. 2. — Fluides aquo-carbo-azotés (COHN) des topazes du stockwerk et du granite de Beauvoir. Même légende que le tableau 1.

ques rares échantillons de ces fluides du stockwerk ont pu se retrouver piégés dans quelques topazes du système Beauvoir, indiscutablement et nettement plus tardives. En l'absence de faits probants, on se contentera de proposer un mécanisme qui, s'il n'est peut-être pas le seul possible, a le mérite de résoudre simplement le problème posé.

Le granite de Beauvoir semble s'être mis en place par intrusions de lames magmatiques pénécontemporaines, les plus récentes s'empilant sur les plus précoces (Jacquot et Gagny, ce volume). Lors de cet événement, chacune des lames a, en cristallisant, évacué vers des niveaux de plus en plus élevés des micaschistes, des fluides salés et riches en fluor. On a vu plus haut que ces fluides, qui ont atteint précocelement le stockwerk à des températures de l'ordre de 500 °C et de pressions d'environ 800 bars (voir plus haut), ont été alors responsables du remplacement partiel du quartz du stockwerk par de la topaze et des micas blancs. Il est alors tout à fait concevable que, lors de cette « opération », une faible partie des fluides COHN du quartz du stockwerk ait été « repiégée » dans la topaze. Quand le granite, poursuivant sa progression vers le haut, a traversé ce stockwerk « topazifié », on sait qu'il en a arraché des fragments. Ces fragments ont été plus ou moins dispersés et il est probable que, parmi eux, se soient trouvées des topazes néoformées du stockwerk, topazes dont certaines auraient « repiégié » des fluides COHN. Considérons des inclusions COHN du quartz du stockwerk, piégées vers 550-600 °C, 1,0 à 1,2 kbar ; leur densité est de l'ordre de 0,50 à 0,55 (fig. 2). Lors de l'intrusion du granite de Beauvoir, le transfert de ces inclusions de quartz vers la topaze s'effectue vers 500 °C, 800 bars : dans ces conditions, la densité normale du fluide est proche de 0,50-0,55. Il n'est donc pas surprenant que les densités des fluides COHN du stockwerk et de celles des topazes soient très comparables (fig. 2 et 11).

Le mécanisme proposé rend bien compte de la répartition des fluides COHN dans le granite de Beauvoir, y compris leur répartition aléatoire. Il implique toutefois qu'une partie de la topaze primaire du granite de Beauvoir ne serait pas magmatique (au sens strict) mais serait héritée des topazes hydrothermales précoces du stockwerk (topaze xénolithique). Le caractère « réfractaire » de la topaze dans le granite (Pichavant et al., ce volume) est en accord avec cette hypothèse.

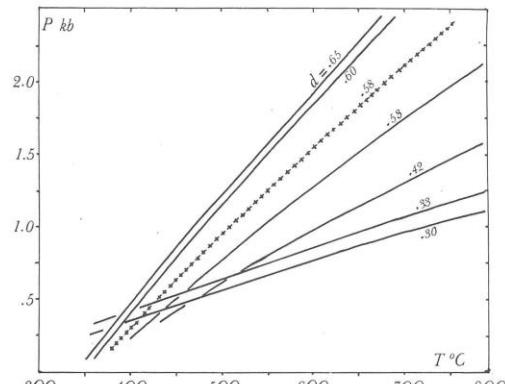


Fig. 11. — Isochores des fluides aquo-carbo-azotés inclus dans la topaze. Lignes continues : fluides de la topaze du granite B2 ; croix : fluides de la topaze du stockwerk (partie supérieure). Comparer avec les fig. 2 et 3.

Isochores of the COHN fluids from the topaz. Solid lines = fluids in the topaz from the Beauvoir granite B2 ; crosses = fluids in the topaz from the upper stockwerk. Compare with fig. 2 and 3.

6. — Conclusions

L'étude des inclusions fluides piégées dans les différentes unités lithologiques recoupées par le sondage Échassières 1, couplée avec l'étude paragénétique détaillée du stockwerk filonien de la Bosse, ont permis de reconstituer l'évolution hydrothermale du site en liaison avec les événements magmatiques qui s'y sont succédés.

Trois stades ont été reconnus.

1. — Stade du stockwerk de la Bosse, avec mise en place de filons quartzo-wolframifères et de filons magmatiques associés, à la suite de la mise en place de l'hypothétique granite de la Bosse. Les fluides précoce comportent une teneur importante en volatils (CO_2 , CH_4 , N_2). Leur dilution par des fluides aqueux plus froids est à l'origine de la précipitation de la wolframite vers 400 °C, à une pression de l'ordre de 1000 à 1200 bars.

2. — Stade du granite des Colettes, dont la mise en place, également estimée à 1000-1200 bars, a essentiellement provoqué un réchauffement de son environnement proche jusqu'à 600 °C, entraînant ainsi des modifications physiques (densité) des fluides les plus denses du stockwerk, notamment ceux responsables du dépôt des wolframites.

3. — Stade du granite de Beauvoir, dont les conditions de mise en place ont pu être estimées à 560-580 °C, 800-900 bars. La première manifestation hydrothermale liée à l'intrusion consiste en l'expulsion, hors du liquide résiduel, de fluides magmatiques enrichis en Na, K, Li, F, Cl, Nb en régime de pression d'abord lithostatique puis, à la suite de fracturation hydraulique, en régime hydrostatique. Cette décompression, de type quasi-adiabatique, fait chuter la pression et la température de 700-800 bars, 500 °C à 100-200 bars, 350-400 °C. Elle entraîne la démixtion des saumures magmatiques initiales en vapeurs diluées et saumures hyperconcentrées. L'ensemble de ces fluides précoce a profondément affecté le stockwerk par dissolution partielle du quartz et précipitations simultanées de la topaze et des micas lithinifères, ainsi qu'en modifiant la cristallochimie des wolframites (enrichissement en niobium, en particulier ; Aissa et al., ce volume). Lors de ces transformations, une infime partie des fluides aquo-carbo-azotés des quartz du stockwerk va être « transférée » dans les topazes néoformées. Certaines de ces topazes vont être entraînées dans le granite B2 en voie d'ascension, où elles constituent de véritables « enclaves » (xénolites) monominérales.

L'introduction de fluides extérieurs dans le granite se manifeste à partir de 350-420 °C. Elle est rendue possible grâce aux fractures nouvellement créées et à l'anomalie thermique que constitue encore le cœur du granite de Beauvoir. Bien entendu, ces fluides extérieurs diluent de plus en plus les saumures, donnant des fluides à salinité très variable, essentiellement dans le granite B1. Pourtant, certaines saumures vont, dans quelques fractures en extension persistante, continuer à se démixter et atteindre très vite la saturation en sels (halite et sylvite) ; ces fluides en ébullition ont alors certainement atteint la surface.

Remerciements

Nous sommes reconnaissants envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué par leur discussions, remarques et critiques, à la mise au point de ce travail, et en particulier A. Autran, M. Bennani, A.M. Boullier, L. Burnol, M. Cuney, M. Fonteilles, A.M. Fouillac, M. Pichavant et J. Touret ainsi qu'à deux lecteurs anonymes. Merci à M. Pichavant qui a accepté de nous communiquer ses premiers résultats expérimentaux obtenus sur les granites de Beauvoir. Nous ne saurions oublier la confiance et l'aide matérielle que nous ont accordés MM. Robert (Coframines), Wilhelm (BRGM) et Foglierini (Pennaroya) au tout début de nos travaux. L'aide de J.M. Claude, J. Dubessy, C. Kostolanyi et D. Ohnenstetter, lors des microanalyses sur solides et fluides, a été essentielle. La réalisation technique du manuscrit a été assurée efficacement par M^{me} D. Perlangeli.

Références bibliographiques

- AISSA M. (1987). — Reconstitution d'un système de paléocirculations hydrothermales et ses conséquences métallogéniques : le district d'Échassières (Massif central français). Thèse de Doctorat INPL, 1 vol., 257 p. + annexes.
- AUBERT G. (1969). — Les coupoles granitiques de Montebras et d'Échassières (Massif central français) et la genèse de leur minéralisation en Sn, Li, W et Be. Mém. BRGM Fr. n° 46, 345 p.
- BENNANI M., MARIGNAC Ch., WEISBROD A. (1987). — Thermal and chemical evolution of the hydrothermal fluids in the Sn-W deposits at Tarmilate (Walme district, Central Morocco). *Terra Cognita*, 7, (2-3), 322 p.
- BOUTALEB M., BENNANI M., BOUCHEZ J.L., DIOT H., MACAUDIÈRE J., MARIGNAC Ch., PÉCHER A., WEISBROD A. (1986). — Le district stanno-wolframifère de Walmès (Maroc Central). Colloque PIRSEM « Facteur de concentrations des Matières Premières minérales », Montpellier, Abstr. vol., pp. 29-30.
- BURNHAM C.W. (1979). — Magmas and hydrothermal fluids. In : « Geochemistry of hydrothermal Ore deposits, 2nd ed., H.L. Barnes ed., pp. 71-136.
- CHEILLETZ A. (1984). — Caractéristiques géochimiques et thermobarométriques des fluides associés aux minéralisations de tungstène du Jbel Aouam (Maroc Central). *Bull. Minéral.*, 107, pp. 255-272.
- CUNAY M. (1984). — Évolution géochimique et métallogénique d'un apex granitique, rapport d'implantation du forage d'Échassières. GPF 2, Document BRGM n° 95-8, pp. 15-38.
- CUNAY M., AUTRAN A., BURNOL L., BROUAND M., DUDOIGNON P., FEYBESSE J.L., GAGNY C., JACQUOT T., KOSAKEVITCH A., MARTIN P., MEUNIER A., MONIER G., TEGEY Y. (1986). — Résultats préliminaires apportés par le sondage GPF sur la coupole de granite albiteux à topaze-lépidolite de Beauvoir (M.C.F.). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **303**, série II, n° 7.
- CLARK S.P. Jr (1966). — Handbook of Physical Constants, Revised edition. Geol. Soc. America, Mem. 97, 587 p.
- DE ROSEN A. (1965 a). — Contribution à l'étude géologique du massif granitique des Colettes et ses minéralisations. Thèse Univ. Paris, 150 p.
- DE ROSEN A. (1965 b). — Évolution continue d'un massif granitique et succession minérale : le massif des Colettes (Échassières, Allier) 1^{re} partie : granite et micaschistes. *Bull. Soc. Fr. Mineral.*, **88**, pp. 678-687.
- DELANEY P.T. (1982). — Rapid intrusion of magma into wet rock : groundwater flow due to pore pressure increase. *J. Geophys. Res.*, **87**, pp. 7739/56.
- DRUMMOND S.E. (1981). — Boiling and mixing of hydrothermal fluids : chemical effects on mineral precipitation. PhD dissertation, Pennsylvania State Univ., 397 p.
- DUBESSY J. (1984). — Simulation des équilibres chimiques dans le système C-O-H. Conséquences méthodologiques pour les inclusions fluides. *Bull. Minéral.*, **107**, 2, pp. 155-168.
- DUBESSY J., RAMBOZ C., NGUYEN TRUNG C., CATHELÉNEAU M., CHAROY B., CUNAY M., LEROY J., POTY B., WEISBROD A. (1987). — Physical and chemical controls (FO_2 , P, pH) of the opposite behaviour of U and Sn-W as exemplified by hydrothermal deposits in France and Great Britain, and solubility data. *Bull. Minéral.*, **110**, 2-3, pp. 261-281.
- DURISOVA J. (1987). — Diversity of fluids in the formation of ore assemblages in the Bohemian massif (Czechoslovakia). IX Symposium on fluid inclusions, ECFRI, Abst. vol., pp. 35-36.
- DURISOVA J., CHAROY B., WEISBROD A. (1979). — Fluid inclusion studies in minerals from tin and tungsten deposits in the Krusne Hory Mountains (Czechoslovakia). *Bull. Min.*, **102**, pp. 665-675.
- FEYBESSE J.M. (1984). — Étude structurale du massif d'Échassières et de son encaissant métamorphique. GPF 2, Document BRGM n° 95-8, pp. 55-72.
- GAGNY C., JACQUOT J. (1985). — Présentation de quelques problèmes mis en évidence par la pétrologie structurale : forage profond Ech. I sur le granite de Beauvoir (Échassières, Allier). Programme GPF, Forage Ech. I, Document BRGM n° 100, pp. 139-163.
- GRATIER J.P., JENATTON L. (1983). — Deformation by solution-deposition and reequilibration of fluid inclusions in crystals depending on temperature, internal pressure and stress. *J. Struct. Geol.*, 6, pp. 112-127.
- GUILIANI G. (1984). — Les concentrations filonniennes à tungstène-étain du massif granitique des Zaér (Maroc Central). Minéralisations et fluides associés. *Minér. Deposita*, **19**, pp. 193-201.
- GUILIANI G., WEISBROD A. (1986). — Les minéralisations stanno-wolframifères du massif des Zaér (Maroc Central). Colloque « Gisements de tungstène », Toulouse, abstr. vol., pp. 91-92.
- IVANOVA G. (1986). — Geochemical conditions of formation of the tungsten mineralization. Colloque « Gisement de Tungstène », Toulouse, Abstr. vol., p. 9.
- IVANOVA G., NAUMOV V. (1987). — Physicochemical conditions of formation of the tungsten mineralization according to the fluid inclusion data. IX Symposium on fluid inclusions, ECFRI, Abstr. vol., pp. 53-55.
- JACQUOT Th., GAGNY C. (1985). — Pétrologie structurale du Massif d'Échassières (M.C.F.). GPF 2, Document BRGM n° 95-08, pp. 39-53.
- JAEGER J.C. (1959). — Temperatures outside a cooling intrusive sheet. *Amer. J. Sci.*, pp. 44-54.
- JAEGER J.C. (1964). — Thermal effects of intrusions. *Reviews of Geophysics*, 2 (3), pp. 443-466.
- KELLY W.C., RYE R.D. (1979). — Geology, fluid inclusion and stable isotope studies in the tin-tungsten deposits of Panasqueira, Portugal. *Econ. Geol.*, **74**, n° 8, pp. 1721-1822.
- KOIDÉ H., BHATTACHARJI S. (1975). — Formation of fractures around magmatic intrusions and their role in ore localization. *Econ. Geol.*, **70**, pp. 781-799.

- LEROY J. (1979). — Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de leur décrépitation. *Bull. Minéral.*, **102**, pp. 584-593.
- LOVERING T.S. (1955). — Temperatures in and near intrusions. *Econ. Geol.*, **50**, pp. 249-281.
- MONIER G., TEGYEY M. (1985). — Sondage Échassières GPF : la pétrographie des différents faciès. GPF 3, Document BRGM n° 100, pp. 39-93.
- NAUMOV V., IVANOVA G. (1971). — The pressure and temperature conditions for formation of wolframite deposits. *Geochemistry Int.*, **6**, pp. 381-394.
- NORONHA F., MANGAS J. (1987). — Hydrothermal evolution of the Sn-W deposits associated with the hercynian granites of the Central-Iberian zone : a review. IX Symposium on fluid inclusions, ECRFI, Abstr. vol., pp. 151-152.
- NORONHA F., DORIA A., KOSZTOLANYI C. (1987). — Fluid inclusions studies of the quartz veins of the Sn-W deposit of Panasqueira, Central Portugal. IX Symposium on fluid inclusions, ECRFI, Abstr. vol., pp. 95-96.
- NORTON D.L. (1984). — Theory of hydrothermal systems. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **12**, pp. 155-177.
- NOYÉ F. (1985). — Étude métallogénique des indices à étain-tungstène de Saint-Mélan (Ardèche, France). Thèse de Spécialité, INPL Nancy, 1 vol., 283 p.
- NOYÉ F., RAMBOZ C., WEISBROD A. (1986). — Les indices stanno-wolframifères des Cévennes Médianes (Massif central français). Colloque « Gisements de tungstène », Toulouse, Abstr., pp. 109-110.
- PÉCHER A. (1981). — Experimental decrepitation and reequilibration of fluid inclusions in synthetic quartz. *Tectonophysics*, **78**, pp. 567-584.
- PÉCHER A. (1984). — Chronologie et ré-équilibrage des inclusions fluides : quelques limites à leur utilisation en microthermométrie. In : « Thermométrie et barométrie géologiques », M. Lagache ed., Soc. Fr. Minéral., vol. 2, pp. 461-485.
- PÉCHER A., BOULLIER A.M. (1984). — Évolution à pression et température élevée d'inclusions fluides dans un quartz synthétique. *Bull. Minéral.*, **107**, 2, pp. 139-153.
- PICHAVANT M., RAMBOZ C., WEISBROD A. (1982). — Fluid immiscibility in natural processes : use and misuse of fluid inclusion data, part I. *Chem. Geology*, **37**, pp. 1-27.
- RAMBOZ C. (1980). — Géochimie et étude des phases fluides des gisements et indices d'étain-tungstène du Sud du Massif central (France). Thèse 3^e cycle, INPL Nancy, 280 p.
- RAMBOZ C. (1986). — Paramètres physiques et facteurs de contrôle des circulations hydrothermales convectives impliquées dans la formation des concentrations de tungstène du Sud du Massif central français. Colloque « Gisements de tungstène », Toulouse, Abstr. vol., pp. 22-23.
- RAMBOZ C., PICHAVANT M., WEISBROD A. (1982). — Fluid immiscibility in natural processes : use and misuse of fluid inclusion data, part II. *Chem. Geology*, **37**, pp. 29-48.
- RAMBOZ C., SCHNAPPER D., DUBESSY J. (1985). — The PVTX_{O₂} evolution of H₂O-CO₂-CH₄ bearing fluid in a wolframite vein. Reconstruction from fluid inclusions studies. *Geoch. Cosm. Acta*, **49**, pp. 205-219.
- ROEDDER E. (1984). — Fluid inclusions. Reviews in Mineralogy, *Mineral. Soc. America*, **12**, 644 p.
- SWANENBERG H.E.C. (1980). — Fluid inclusions in high-grade metamorphic rocks from S.W. Norway. *Geol. Ultraact.*, Utrecht, **25**, 147 p.
- TOULMIN P. III, CLARK S.P.Jr (1967). — Thermal aspects of ore formation. In : « Geochemistry of Hydrothermal ore deposits », 1st ed., H.L. Barnes ed., 1 vol., pp. 437-464.
- VIGNERESSE J.L., MENICHETTI Y., CANNAT M. (1984). — Interpretation gravimétrique du massif d'Échassières. GPF 2, Document BRGM n° 95-8, pp. 81-91.
- WEISBROD A., POTY B. (1975). — Thermodynamics and geochemistry of hydrothermal evolution of the Mayres Pegmatite. *Pétrologie*, I, part I (1-16) and II (89-102).
- WEISBROD A. (1981). — Fluid inclusions in shallow intrusives. In : « Short Course in Fluid Inclusions », L.S. Hollister and M.L. Crawford ed., Mineral. Assoc. Canada, Short Course Handbook, vol. 6, pp. 241-271.
- WEISBROD A. (1982). — Physical and Chemical Changes in Natural Fluids in Hydrothermal Processes and Mineral Deposition, studied with Fluid Inclusions. *Ber. Bundesges. Phys. Chem.*, **86**, pp. 1016-1027.
- WEISBROD A. (1984). — Utilisation des inclusions fluides en géothermobarométrie. In : « Thermométrie et barométrie géologiques », M. Lagache ed., *Soc. Fr. Minéral.*, vol. 2, pp. 413-459.
- WEISBROD A. (1986). — Caractères généraux des phases fluides dans les indices et gisements de tungstène et d'étain. Colloque PIRSEM « Facteurs de concentration des matières premières », Montpellier, Abstr. vol., 89-92.
- WEISBROD A. (1987). — Geochemistry of the hydrothermal tin and tungsten vein-type deposits, with emphasis on the fluid phases. In : « Geochemistry of Ore-Forming Processes », H. Barnes ed., NATO ASI, en préparation.
- WEISBROD A., MARIGNAC C. (1987). — General features and mechanisms of Sn-W quartz vein formation in peri-batholithic environment, from fluid inclusions data. IX Symposium on fluid inclusions ECRFI, Abstr. vol., pp. 131-132.
- ZHANG YI GANG, WEISBROD A. (1987). — The PVTX relationships on the system LiCl-H₂O between 0.5 and 3 kbars. Comparison with other alkali chlorides and geochemical consequences. *Bull. Min.*, in prep.