

Les phases fluides associées aux corps sulfurés du gisement d'or Mina III, ceinture de roches vertes de Crixás, Etat de Goiás, Brésil

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 320, série II a,
p. 1171 à 1178,
1995

Paulo de Tarso Ferro de Oliveira Fortes et Gaston Giuliani

P.T.F.O. F. : Université de Brasília,
IG/GEO, Asa Norte,
70910-900, Brasília, Brésil ;

G. G. : ORSTOM, Département TOA,
UR 13, 75480 Paris Cedex 10,
France
et CRPG-CNRS,
BP n° 20, 54520 Vandœuvre Cedex,
France.

Résumé L'étude des inclusions fluides piégées dans le quartz associé aux corps sulfurés du gisement d'or de Crixás a révélé le piégeage pénécotemporain d'inclusions fluides précoces, caractérisant trois systèmes fluides à composition complexe et variée : (1) fluides carbonique, aquo-carbonique et aqueux dans le système $H_2O-NaCl-CO_2-CH_4-N_2$ (types C1, CL1, LC1 et L1), (2) fluide aquo-carbonique saturé en NaCl et KCl dans le système $H_2O-NaCl-KCl-CO_2-CH_4-N_2$ (type S) et (3) fluide « carboné » dans le système $CH_4-N_2 \pm H_2O \pm H_2S \pm C_2H_6$ (types C'1 et CL'1). Les conditions P-T de piégeage pour les fluides (1) et (2) sont estimées à 1.5-3.0 kb, 375-475°C et la signification du fluide (3) est discutée.

Mots-clés : Brésil, Crixás, Mina III, Ceinture de roches vertes, Archéen, Corps sulfurés, Or, Fluides.

Abstract Fluid phases related to the massive sulfide ore bodies from Mina III gold deposit, Crixás Greenstone belt, Goiás State, Brazil

The study of quartz-hosted fluid inclusions associated with the massive sulfide ore bodies from Mina III gold deposit revealed the contemporaneous trapping of early fluid inclusions characterizing three fluid systems of complex and variable composition: (1) carbonic, aquo-carbonic and aqueous fluids in the $H_2O-NaCl-CO_2-CH_4-N_2$ system (types C1, CL1, LC1 and L1), (2) halite-sylvite-bearing aquo-carbonic fluid in the $H_2O-NaCl-KCl-CO_2-CH_4-N_2$ system (type S) and (3) "carbonaceous" fluid in the $CH_4-N_2 \pm H_2O \pm H_2S \pm C_2H_6$ system (types C'1 and CL'1). The P-T trapping conditions for the fluids (1) and (2) are estimated at 1.5-3.0 kb, 375-475°C and the significance of fluid (3) is discussed.

Keywords: Brazil, Crixás, Mina III, Greenstone belt, Archean, Massive sulfides, Gold, Fluids.

**Abridged
English
Version**

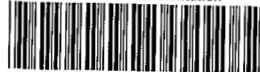
THE Mina III gold deposit is the largest gold mine of Goiás State with reserves estimated to 5.2 Mt with an average grade of 12.7 g/t (Yamaoka and Araujo, 1986). It is located within the Archaean volcanosedimentary series of the Crixás Greenstone belt (Saboia, 1979), near the contact between basic metavolcanics and metasedimentary

rocks (Rio Vermelho and Ribeirão das Antas formations, respectively); in the Crixás Group (Jost and Oliveira, 1991; figures 1 A and B). Two main mineralized zones are mined out; - the Upper Ore Zone consists of irregular massive sulfide bodies associated with schists within a sequence of marbles and carbonated schists. Free gold occurs as inclusions and/or

Note

présentée par
Zdenek Johan.

remise le 29 mars 1994,
acceptée après révision
le 13 mars 1995.



in microfractures within arsenopyrite (70-90% of the ore) and more rarely in gangue minerals (quartz, ilmenite, plagioclase, biotite, apatite, carbonates); - the Lower Ore Zone is related to a free-gold-bearing concordant quartz vein located in carbonaceous schists. Hydrothermal alteration (carbonatization, sericitization, sulfidation and silicification) postdates the metamorphic peak (epidote-amphibolite facies, Thomson and Fyfe, 1990) and have promoted a retrogression of the paragenesis in the greenschist facies (Fortes and Nilson, 1991). The arsenopyrites are zoned: richer in sulfur in the centre and richer in arsenic in the border of the grains, with which gold is preferentially associated (Fortes and Giuliani, 1993).

Fluid inclusions (FI) in quartz samples from the Upper Ore Zone have been studied by microthermometry, SEM and Raman spectrometry (tables I and II). Two main episodes of fluid circulation are recognized: - early fluid inclusions (EFI) found in mature fractures which do not crosscut the quartz grain boundaries are widespread as clusters in quartz; - late fluid inclusions (LFI) trapped along immature fractures. EFI consist of H_2O -NaCl-KCl- $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ FI (type S) with salinities in the range 26.9 to 52.7 Wt % eq. NaCl, $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ FI (type C1), H_2O -NaCl- $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ FI (types CL1 and LC1) with salinities varying between 1.4 and 21.9 Wt % eq. NaCl, H_2O -NaCl FI (type L1) with traces of CO_2 , CH_4 , N_2 and salinities in the range 1.7 and 13.8 Wt % eq. NaCl, and finally CH_4 - $N_2 \pm H_2O \pm H_2S \pm C_2H_6$ FI (types C'1 and CL'1). All these types of EFI can coexist in the same trail or can occur in distinct parallel or crosscutting fractures. On heating, type S homogenizes to the liquid by vapour dissolution (266-461°C) after halite dissolution (187-460°C). Other FI types decrepitate or leak at temperatures close to their total homogenization temperature, in the same range as that of type S FI. LFI consist of $CO_2 \pm CH_4 \pm N_2$ carbonic FI (type C2) and aqueous FI (type L2) with salinities between 1.5 and 9.7 Wt % eq. NaCl. On heating, type L2 homogenizes to the liquid between 107° and 222°C. The simultaneous trapping of C1, CL1, LC1 and L1 EFI types in the H_2O -NaCl- CO_2 - CH_4 - N_2 system, in

the absence of recognizable leakage or necking down features, the presence of a wide range of degree of filling and of global compositions, and the fact that all of them decrepitate in the same range of temperature (figures 2 A and B), allow us to propose a mechanism of heterogeneous trapping for these FI. Such heterogeneous trapping has been reported for other CO_2 -high salinity system and also for some gold deposits (Anderson *et al.*, 1992; Giuliani *et al.*, 1993). They may represent unmixed aquo-carbonic fluids, probably of metamorphic origin. The origin of type S EFI may be related to metamorphic devolatilization reactions of the marbles (Crawford, 1981), retrometamorphic processes (Crawford *et al.*, 1979) and/or reactions with micas and amphiboles (Frape and Fritz, 1987), as there is no evidence for the circulation of magma-derived fluids or basin-derived fluids. The circulation of CH_4 - N_2 -rich $\pm H_2O \pm H_2S \pm C_2H_6$ FI (types C'1 and CL'1) may have originated from reactions involving carbon present in the carbonaceous schists. Moreover, carbon and oxygen isotope data have brought evidence of a sedimentary contribution for the carbon of the carbonaceous schists (Fortes and Takaki, 1993). Such fluids were already described within gold-bearing quartz veins of the Fazenda Maria Preta and Fazenda Brasileiro deposits in the Bahia State, Brazil (Xavier *et al.*, 1994), which are located in geological settings similar to Crixás. However, for these three deposits, the existence of C_2 - C_4 hydrocarbons for fluids interpreted as trapped at temperatures higher than 360°C is problematic considering that these components are normally cracked at 200°C. This thermodynamic incompatibility led us to question their real relationship in space and time with the EFI. At the moment, the debate is opened and for this reason these fluids were not considered in the estimation of the *P-T* trapping conditions of the EFI. The arsenopyrite geothermometer combined with the isochoric curves of representative EFI (figure 2 C), indicate trapping conditions for these fluids in the range $P = 1.5$ -3.0 kbar and $T = 375$ -475°C.

1. INTRODUCTION

Le gisement aurifère Mina III de Crixás est la plus grande mine d'or en exploitation de l'État du Goiás avec des réserves estimées à 5,2 Mt d'un minerai à 12,7 g/t (Yamaoka et Araujo, 1986). Il est encaissé dans une série volcano-sédimentaire archéenne (2 800-2 700 Ma), métamorphisée dans le faciès épidote-amphibolite (Thomson et Fyfe, 1990), qui appartient à la ceinture de roches vertes de Crixás (Saboia, 1979). La mine est située dans la zone de contact entre des métavolcanites basiques et des roches métasédimentaires appartenant, respectivement, aux Formations Rio Vermelho et Ribeirão das Antas du Groupe Crixás (Jost et Oliveira, 1991 ; figures 1 A et B). Deux zones minéralisées sont actuellement exploitées : la Zone Supérieure et la Zone Inférieure. Elles résultent de la circulation de fluides hydrothermaux (origine épigénétique), qui provoqua un rétro-métamorphisme des roches encaissantes dans les conditions du faciès schistes verts. Les altérations hydrothermales sont du type carbonatation, séricitisation, sulfuration et silicification. Les minéralisations sont contrôlées par une linéation parallèle à subparallèle aux axes de plis couchés et asymétriques qui furent générés par un cisaillement simple progressif en régime ductile (Fortes et Nilson, 1991). La Zone Supérieure (teneur du minerai = 17-18 g/t) est exploitée sur 100 m de dénivelé et s'étend sur 800 m. Elle est formée par des corps irréguliers de sulfures massifs (arséno-pyrite dominante, pyrrhotite, chalcopyrite) qui sont concordants avec la schistosité. Leur épaisseur est comprise entre 0,5 et 2,5 m et leur extension voisine de 100 m. Les corps sont encaissés dans des schistes à séricite, des schistes à chlorite et grenat et des schistes à magnétite intercalés dans une séquence de marbres ferro-dolomitiques et de schistes à chlorite et carbonates (figures 1 B). L'or natif s'observe le plus souvent dans l'arséno-pyrite, en inclusions ou dans des microfractures, plus rarement avec les minéraux de la gangue, tels le quartz et l'ilménite. Les arséno-pyrites sont zonées, soit riches en arsenic

en bordure ($\text{Fe}_{32,4}\text{As}_{34,7}\text{S}_{32,9}$), soit riches en soufre au coeur ($\text{Fe}_{32,8}\text{As}_{30,8}\text{S}_{36,4}$), mais dans ce cas dépourvues d'or (Fortes et Giuliani, 1993). La Zone Inférieure présente de l'or natif (teneur du minerai = 6,5 g/t) disséminé dans un filon de quartz de 1,5 km d'extension, d'épaisseur comprise entre 0,5 et 3,0 m et concordant avec des schistes à matière carbonée (Fortes et Nilson, 1991).

2. ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE

Les corps sulfurés sont composés principalement de cristaux d'arséno-pyrite automorphes à subautomorphes (70-90 %). La gangue (30-10 %) est formée de quartz, plagioclase, biotite, apatite, ilménite et carbonates. Le quartz cimente généralement les cristaux d'arséno-pyrite. Il possède des contours irréguliers et montre une extinction ondulante et des bandes de déformation.

L'étude pétrographique des inclusions fluides (IF) associées au quartz a permis d'identifier : (1) des inclusions précoces (80 % des IF), soit piégées suivant des microfractures restreintes aux limites de grains, soit dispersées dans le quartz, (2) des inclusions tardives disposées suivant des fractures qui recoupent les limites de grains. Les inclusions fluides précoces, de taille comprise entre 5 et 50 μm , sont de plusieurs types : IF aquo-carboniques à cube de halite avec parfois de la sylvite (type S, 25 % des IF), IF carboniques et « carbonées » monophasées (type C1 et C'1 respectivement, 5 % des IF), IF aquo-carboniques et biphasées avec des coefficients de remplissage ($R1 = \text{volume phase liquide/volume total de l'inclusion}$) variables (type CL1 et CL'1, 25 % des IF : $10 < R1 < 40 \%$ et type LC1, 20 % des IF : $40 < R1 < 85 \%$), et enfin des IF biphasées aqueuses (type L1, 5 % des IF : $30 < R1 < 60 \%$). Les types C1, CL1, LC1 et L1 peuvent coexister dans une même fracture, mais ils peuvent aussi se rencontrer séparément dans des fractures parallèles ou sécantes. Les fluides « carbonés » C'1 et CL'1 sont rares (< 5 % des IF) et peuvent coexister avec les autres types d'IF. Les IF de type S se localisent dans des microfractures distinctes, mais peuvent aussi coexister avec les autres types

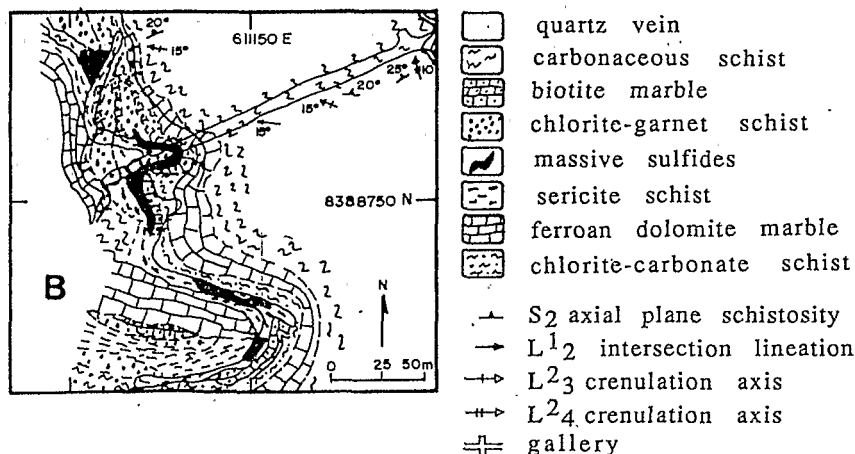
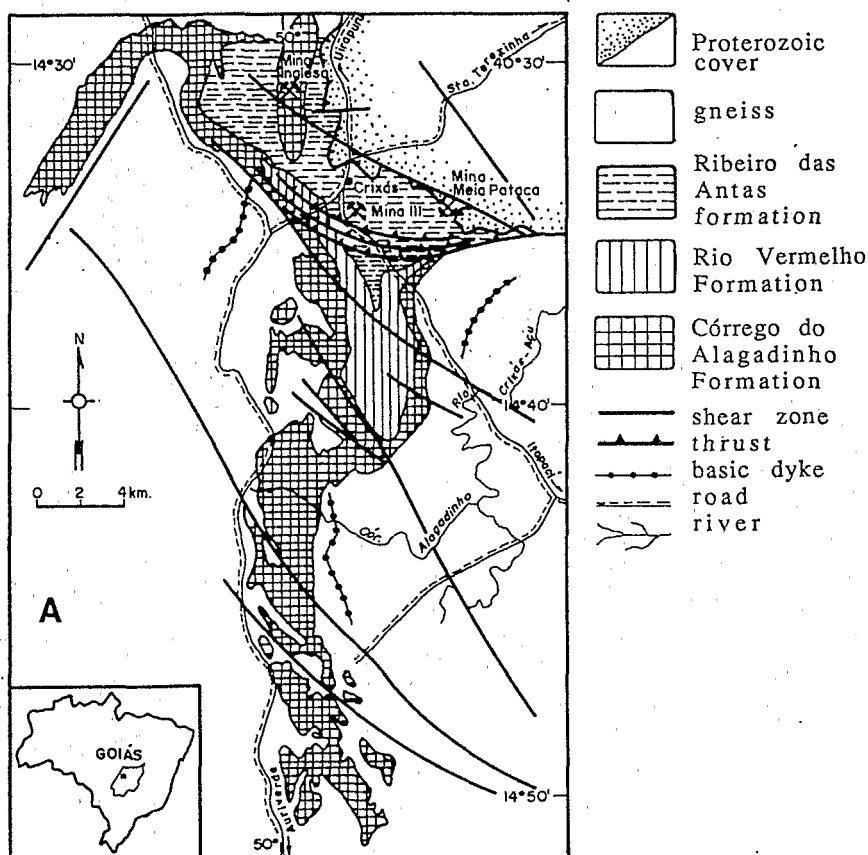


Figure 1 Légende page suivante.

Caption on following page.

d'IF. La présence simultanée de tous les types d'IF précoces dans une même plage de quartz est occasionnelle et due à des intersections de fractures. Les fluides tardifs correspondent à des IF biphasées aqueuses (type L2, 5 % des IF) et à des IF monophasées carboniques (type C2, 15 % des IF).

3. TECHNIQUES ANALYTIQUES

L'étude des phases fluides a été réalisée sur neuf lames épaisses de quartz provenant de trois échantillons représentatifs du minéral de la Zone Supérieure. L'étude microthermométrique de 400 inclusions fluides a été effectuée à l'aide d'une platine de type Chaixmeca à l'Université de Brasília et d'une platine Fluid Inc. (USGS) au CRPG/CNRS, calibrées pour la température. D'autre part, les fractions molaires du CO_2 , CH_4 , N_2 et C_2H_6 de 20 inclusions fluides ont été déterminées sur une microsonde Raman de type DILOR X-Y (CREGU, Vandœuvre).

4. ÉTUDE MICROTHERMOMÉTRIQUE

Le refroidissement des IF de type S, CL1, CL'1 et LC1 a permis de mesurer des températures de fusion du CO_2 qui s'étalent entre $-61,1$ et $-56,6$ °C (tableau I). Les mesures effectuées à la microsonde Raman ont permis de montrer que CH_4 et/ou N_2 sont les espèces qui sont responsables de l'abaissement des points de fusion en dessous du point triple de CO_2 pour ces inclusions aquo-carboniques (tableau II). Les salinités varient entre 52,7 (type S) et 1,4 % poids équivalent NaCl (type LC1). Pour les IF de type S, les températures eutectiques comprises entre -60 et -50 °C et les températures de fusion de la glace à $-36,9$ °C, nous indiquent la présence de Na^+ mais aussi de Ca^{2+} dans la solution. Les IF de type C'1 et CL'1 ont montré des températures d'homogénéisation en phase vapeur entre -134 et $-80,3$ °C (tableau II). Ces inclusions « carbonées » se caractérisent par la présence d'importantes quantités de CH_4 (> 43 mole%), N_2 (26,8 mole%), H_2S et C_2H_6 (tableau II). Les IF de type L1 possèdent une salinité comprise entre 1,7 et 13,8 % poids éq. NaCl et l'étude Raman a mis en évidence la présence dans la phase vapeur de traces de CO_2 , CH_4 et N_2 . Pour les fluides tardifs, la salinité des IF de type L2 varie entre 1,55 et 9,72 % poids éq. NaCl, et les données microthermométriques des IF de type C2 sont comparables à celles de type C1.

Tableau I Données microthermométriques des différents types d'inclusions fluides. Vg, Vl, Vs = volume occupé respectivement par la phase gazeuse, liquide et solide dans la cavité d'inclusion fluide ; Tf CO₂ (Tfg, Tfc, TfHyd.) = température de fusion du CO₂ (de la glace, du clathrate, de l'hydrohalite, respectivement) ; Th = température d'homogénéisation en phase liquide (L) ou en phase vapeur (V) du CO₂, CH₄-N₂ ; TsNaCl (TsKCl) = température de dissolution de la halite (de la sylvite) ; TD = température de décrépitation ; TH = température d'homogénéisation totale en phase liquide (L) ; NaCl (%) = salinité calculée suivant la valeur de Tfg (Potter *et al.*, 1978 ; Hall *et al.*, 1988) ou Tfc (Diamond, 1992); NM = non mesuré.

Microthermometric data for the different fluid inclusion types. Vg, Vl, Vs = respective volume occupied by the gas, liquid and solid phases in FI at room temperature; Tf = temperature of final melting of: CO₂, g (ice), C (clathrate), Hyd. (hydrate); Th = temperature of homogenization of: CO₂, CH₄-N₂; TD = temperature of decrepitation; TH = temperature of total homogenization; Ts = temperature of dissolution of halite (NaCl) and sylvite (KCl); NaCl (%) = salinity calculated by using Tfg (Potter *et al.*, 1978; Hall *et al.*, 1988) or Tfc (Diamond, 1992); NM = not measured.

Type	Taille (µm)	Vg (%)	Vl (%)	Vs (%)	TfCO ₂ (°C)	Tfg (°C)	Tfc (°C)	TfHyd. (°C)	ThCO ₂ (°C)	ThCH ₄ -N ₂ (°C)	TsNaCl (°C)	TsKCl (°C)	TD (°C)	TH (°C)	NaCl (%)
S	6-50	10-30	80-40	10-30	-57,3/ -56,7	-36,9/ -10,0	-25,3/ -11,1	+3,4/ +17,1	+12,4/ +31 (L)	-	+185/ +467	+167/ +299	+255/ +483	+266/ +461 (L)	30,7/ 52,7
C1	6-50	0	100	-	-57,9/ -56,8	-	-	-	+11,5/ +23,7 (L)	-	-	-	-	-	-
CL1	6-50	60-90	35-10	5-0	-57,9/ -56,7	-20,3/ -3,2	-9,6/ +8,3	+10,4/ +14	+9,2/ +29,9 (L, V)	-	-	-	+205/ +377	-	2,9/ 21,9
C'1	6-50	100	0	-	-	-	-	-	-	-108/ -83 (V)	-	-	-	-	-
CL'1	6-50	60-90	40-10	-	-	-19/ -16,5	+3/ +7,4	-	-	-134/ -105 (V)	-	-	NM	NM	-
LC1	6-36	10-60	85-40	5-0	-61,1/ -56,6	-12,9/ -0,2	-27,8/ +3,0	+4/ +18,5	+7,6/ +29,7 (L)	-	-	-	+184/ +460	-	1,4/ 20,4
L1	6-24	40-70	60-30	-	-	-11,3/ -2,5	+1,5/ +13,2	-	-	-	-	-	+274/ +385	-	1,7/ 13,8
L2	6-24	10-20	90-80	-	-	-7,9/ -2,9	-	-	-	-	-	-	-	+107/ 122 (L)	1,5/ 9,7
C2	6-12	-	-	-	-57,5/ -56,6	-	-	-	+14,5/ +29,8 (L)	-	-	-	-	-	-

Le chauffage des IF de types CL1, LC1 et L1 provoque la décrépitation de toutes les inclusions ($184^\circ < TD < 385^\circ \text{C}$). Les inclusions de type S ont des températures d'homogénéisation totale en phase liquide comprises entre 266 et 401 °C (mode = 330 °C). Celles-ci s'effectuent par disparition de la phase vapeur après la dissolution des cristaux de halite ($185^\circ < Ts < 374^\circ \text{C}$) et/ou sylvite ($167^\circ < Ts < 299^\circ \text{C}$). Les inclusions de type L2 possèdent des températures d'homogénéisation comprises entre 107 et 222 °C (mode 120 °C) en phase liquide.

5. CARACTÉRISATION ET SIGNIFICATION DES PHASES FLUIDES PIÉGÉES PAR LE QUARTZ

L'étude pétrographique et microthermométrique des IF précoces a montré la coexistence de trois systèmes fluides à composition complexe et variée qui ont été piégés dans un système de microfractures pénécontemporaines : (1) fluides carbonique, aquo-carbonique et aqueux dans le système H₂O-NaCl-CO₂-CH₄-N₂ (types Cl, CL1, LC1 et L1), (2) fluide aquo-carbonique saturé en

Figure 1 A. Carte géologique de la ceinture des roches vertes de Crixás et localisation de la mine d'or Mina III. B. Carte géologique de la Zone minéralisée Supérieure de Mina III.

A. Geological map of Crixás greenstone belt and location of Mina III gold deposit. B. Geological map of the Upper Ore Zone of Mina III.

Tableau II Données Raman obtenues pour la fraction volatile (CO₂, CH₄, N₂, H₂S, C₂H₆, en mole %) des principaux types d'inclusions fluides.
Raman derived relative composition of the volatile part (CO₂, CH₄, N₂, H₂S, C₂H₆, in mole %) for selected fluid inclusion types.

Type	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ S	C ₂ H ₆	Type	CO ₂	CH ₄	N ₂	H ₂ S	C ₂ H ₆
S	79,80	15,12	5,48			CL'1	73,19	26,78			0,04
	89,02	10,98						43,19	56,61		
	95,82	0,94	3,24			LC1	50,87	48,19	0,29	0,65	
	97,28	0,84	1,88				98,50	0,52	0,98		
	87,22	9,43	3,35				98,44	0,32	1,24		
C1	95,47	2,10	2,43			91,47	6,94	1,48	0,11		
CL1	96,21	2,94	0,85			88,84	5,59	5,57	0,11		
	92,23	4,64	3,13			L1	32,64	54,42	12,94		
	94,58	2,00	3,42				30,61	49,49	19,9		
C'1		58,31	40,87	0,61	0,21	C2	93,64	2,75	3,61		

NaCl et KCl dans le système H₂O-NaCl-KCl-CO₂-CH₄-N₂ (type S) et (3) fluide « carboné » dans le système CH₄-N₂ ± H₂O ± H₂S ± C₂H₆ (types C'1 et CL'1).

L'étude des IF de type C1, CL1, LC1 et L1 met en évidence le piégeage simultané de fluides à composition variable dans le système H₂O-NaCl-CO₂-CH₄-N₂. Ces inclusions présentent des degrés de remplissage très dispersés (figure 2 A) et des variations importantes des paramètres microthermométriques, de la salinité (figure 2 B) et du contenu de la phase volatile (tableau II) et, en conséquence, de la composition globale des fluides. Le piégeage simultané de fluides à composition variable dans le système H₂O-NaCl-CO₂-CH₄-N₂ pose la question du processus responsable de cette association d'inclusions. Ces IF ne présentent aucune évidence de phénomène de « necking-down » ou de fuite et elles décrépissent dans la même gamme de température. En conséquence, un modèle de démixion d'un fluide homogène n'apparaît pas satisfaisant, mais un mécanisme de piégeage hétérogène (immiscibilité fluide) probable: De tels processus ont déjà été reportés pour d'autres systèmes fluides à CO₂ et haute salinité et notamment pour des gisements d'or (Anderson *et al.*, 1992 ; Giuliani *et al.*, 1993). Le piégeage peut avoir résulté d'un fluide aquo-carbonique immiscible, probablement d'origine métamorphique.

La présence de saumures, IF de type S, peut être reliée aux processus soit de métamorphisme de roches carbonatées (Craw-

ford, 1981), représentées dans la mine III par les marbres ferro-dolomitiques, soit de rétro-métamorphisme (Crawford *et al.*, 1979) et/ou à des réactions avec des amphiboles (roches métabasiques ; Frapé et Fritz, 1987) et surtout des phengites (méta-marnes) qui peuvent enrichir le fluide en potassium. Aucune évidence géologique ne supporte une contribution magmatique ou la circulation tardive d'eaux de formation échappées d'un bassin sédimentaire. Même en l'absence de données isotopiques sur ces fluides, l'hypothèse métamorphique semble la plus probable.

La coexistence des IF de type S avec les types C1, CL1, LC1 et L1 peut permettre aussi d'envisager, pour les fluides précoces, la circulation de deux pôles synchrones de fluides de composition contrastée (types S et LC1 par exemple), dont les autres types pourraient dériver par mélange total ou partiel (existence d'une lacune de miscibilité entre les compositions des deux pôles).

La circulation de fluides riches en méthane et azote, IF de types C1' et CL1', peut être reliée au métamorphisme de roches riches en matière carbonée d'origine organique, présentes dans la Zone Inférieure de la mine (méta-marnes). D'ailleurs, les données isotopiques du carbone et de l'oxygène obtenues sur les schistes à matière carbonée et les marbres indiquent l'origine sédimentaire du carbone (Fortes et Takaki, 1993). De tels fluides « carbonés » ont déjà été mis en évidence dans les filons de quartz aurifères

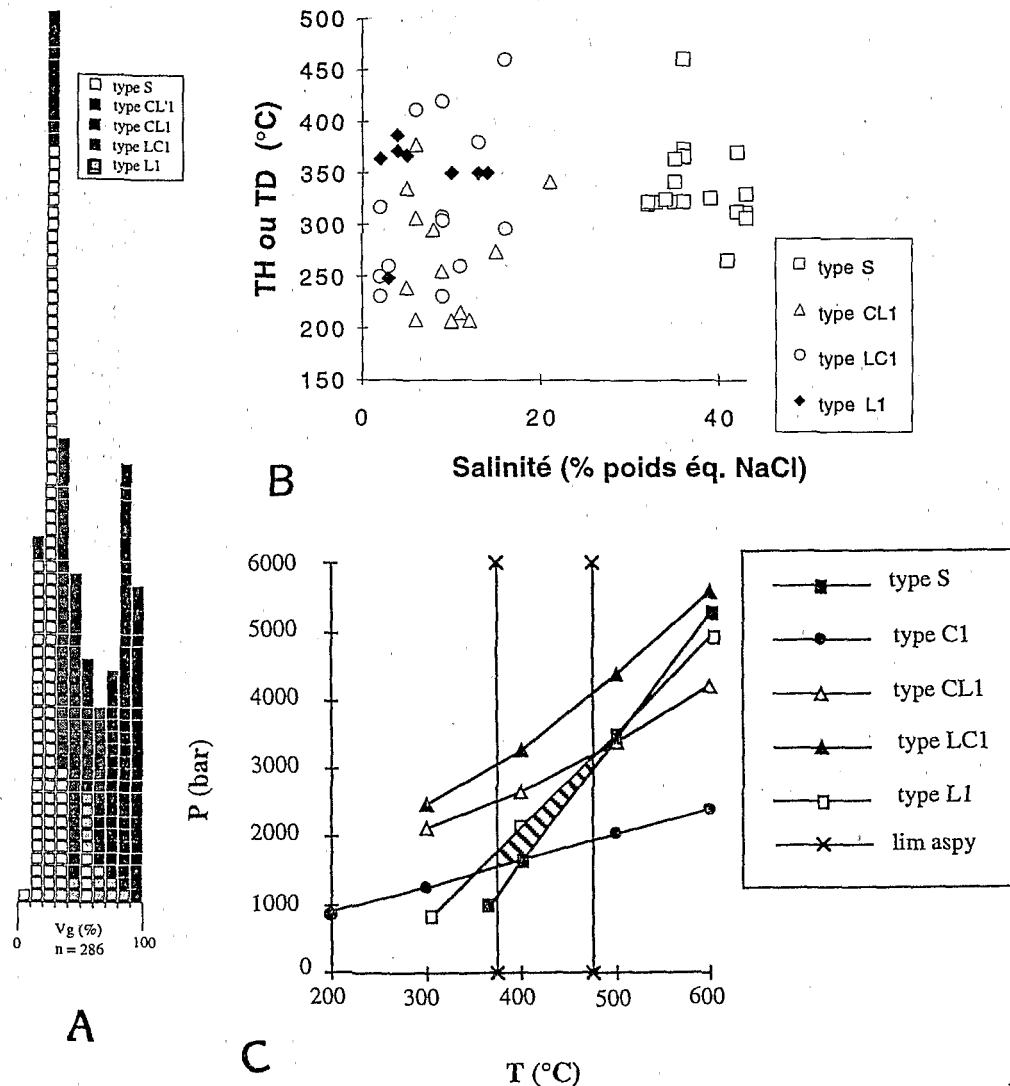


Figure 2. Inclusions fluides précoces. A. Histogramme représentant le volume occupé par la phase gazeuse (Vg, %) pour les types S, LC1, CL1, CL'1 et L1); B. Diagramme TH ou TD (température d'homogénéisation totale ou température de décrépitation, °C), salinité (% poids équivalent NaCl); C. Conditions Pression (P, bar), Température (T, °C) de piégeage des fluides précoces. Les tracés isochores correspondent aux compositions globales des IF représentatives suivantes : type S ($X_{H_2O} = 0,84$, $X_{NaCl} = 0,16$; $d_s = 1,087 \text{ g/cm}^3$); type C1 ($X_{CO_2} = 0,98$; $CH_4 = 0,02$; $d_s = 0,76 \text{ g/cm}^3$); type CL1 ($X_{H_2O} = 0,675$, $X_{NaCl} = 0,023$, $X_{CO_2} = 0,299$, $X_{CH_4} = 0,003$, $d_s = 0,864 \text{ g/cm}^3$); type LC1 ($X_{H_2O} = 0,865$, $X_{NaCl} = 0,054$, $X_{CO_2} = 0,08$, $X_{CH_4} = 0,002$; $d_s = 0,91 \text{ g/cm}^3$); type L1 ($X_{H_2O} = 0,984$, $X_{NaCl} = 0,016$; $d_s = 0,848$; les traces de CO_2 , CH_4 et N_2 détectées au Raman n'ont pas été considérées dans le calcul). Le domaine en hachuré représente les conditions P-T de piégeage de ces fluides.

Early fluid inclusions. A. Histogram showing the volume occupied by the vapour phase (Vg, %) for types S, LC1, CL1, CL'1 and L1 at room temperature; B. TH or TD (temperature of total homogenization or temperature of decrepitation, °C) versus salinity (weight % equivalent NaCl) diagram for types S, CL1, LC1 and L1; C. Pressure (P, bar) versus Temperature (T, °C) trapping conditions for the early fluids. The isochore curves correspond to the following representative fluid composition: type S ($X_{H_2O} = 0.84$, $X_{NaCl} = 0.16$; $d_s = 1.087 \text{ g/cm}^3$); type C1 ($X_{CO_2} = 0.98$; $CH_4 = 0.02$; $d_s = 0.76 \text{ g/cm}^3$); type CL1 ($X_{H_2O} = 0.675$, $X_{NaCl} = 0.023$, $X_{CO_2} = 0.299$, $X_{CH_4} = 0.003$; $d_s = 0.864 \text{ g/cm}^3$); type LC1 ($X_{H_2O} = 0.865$, $X_{NaCl} = 0.054$, $X_{CO_2} = 0.08$, $X_{CH_4} = 0.002$; $d_s = 0.91 \text{ g/cm}^3$); type L1 ($X_{H_2O} = 0.984$, $X_{NaCl} = 0.016$; $d_s = 0.848$). The stippled area represents the P-T trapping conditions for the early fluids.

des mines de Fazenda Maria Preta et Fazenda Brasileiro (Xavier *et al.*, 1994), lesquelles se localisent dans un contexte géologique similaire à celui de Crixás. Cependant, dans les trois cas cités, l'existence d'hydrocarbures de type C_2 - C_4 dans des fluides piégés à des températures supérieures à 360 °C (Xavier *et al.*, 1994) est problématique sachant que vers 200 °C, les alcanes sont transformés en méthane. A Crixás, ces fluides « carbonés » sont très rares, mais ils sont apparemment associés avec les fluides précoces. L'incompatibilité thermodynamique de leur existence nous permet de poser la question de leur réelle relation spatio-temporelle avec les fluides précoces. Une

des réponses pourrait être un piégeage tardif ($T < 200$ °C ou circulation de fluides de surface) suivant des microfissures ou des joints de grain, seulement visibles par cathodoluminescence. Cependant, les données géologiques, notamment le degré de métamorphisme atteint par l'ensemble de la série (faciès schiste vert), ne permettent pas d'envisager une libération d'alcanes post-métamorphisme. Le problème de leur signification géologique est posé et ainsi, ces fluides « carbonés » ne seront pas considérés pour l'estimation des conditions de piégeage des systèmes fluides précoces.

Les conditions de piégeage des fluides précoces ont été estimées à partir du tracé

de leurs isochorés et du géothermomètre fourni par l'arsénopyrite. Les isochores des IF des types Cl, L1 et S ont été calculées à partir du programme MacFlinCor (Brown et Hagemann, 1994) et leur composition et densité sont reportées dans la figure 2 C. Le tracé isochore des fluides CL1 et LCl issu du piégeage hétérogène en proportions variables de deux fluides immiscibles n'a pas été considéré, sachant que de tels fluides présentent des $Th > T_{piégeage}$. Suivant ces considérations, les conditions $P-T$ de piégeage des fluides précoces sont estimées à 1,5-3,0 kb et 375-475 °C (figure 2 C).

L'origine de l'or dans la mine III de Crixás n'a pas été déterminée. Cependant, les formations basiques et ultrabasiques de la partie basale de la ceinture de roches vertes sont de bons candidats. La présence des minéralisations aurifères au contact schistes chloriteux-schistes à magnétite (roches métabasiques) et schistes à matière carbonée-marbres (roches métasédimentaires) illustre probablement le contrôle chimique joué par ces formations sur la composition des fluides (origine en partie proximale) et sur la déstabilisation des complexes sulfurés responsables de la précipitation de l'or.

Remerciements : Les auteurs tiennent à remercier pour leur appui la Compagnie minière Serra Grande Ltda, l'UnB, le CNPq, l'ORSTOM (TOA, UR 13) et le CNRS-CRPG, J. Dubessy et M.C. Boiron (CREGU, Vandœuvre) pour les analyses à la microsonde Raman et Cl. Ramboz pour sa revue. Contribution CRPG n° 1099.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDERSON, M. R., RANKIN, A. H. et SPIRO, B., 1992. Fluidmixing in the generation of mesothermal gold mineralisation in the Transvaal Sequence, Transvaal, South Africa, *Eur. J. Mineral.*, 4, p. 933-948.
- BROWN, P. E. et HAGEMANN, S. G., 1994. MacFlinCor: a computer program for fluid inclusion data reduction and manipulation, Department of Geology, Madison, WI 53707, USA.
- CRAWFORD, M. L., FILER, J. et WOOD, C., 1979. Saline fluid inclusions associated with retrograde metamorphism, *Bull. Mineral.*, 102, p. 562-568.
- CRAWFORD, M. L., 1981. Fluid inclusions in metamorphic rocks-low to medium grade, *Short Course in Fluid Inclusions*, Mineral. Assoc. Canada, p. 157-181.
- DIAMOND, L., 1992. Stability of CO₂ clathrate hydrate + CO₂ liquid + CO₂ vapour + aqueous KCl-NaCl solutions: experimental determination and application to salinity estimates of fluid inclusions, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 56, p. 273-280.
- FORTES, P. T. F. O. et NILSON, A. A., 1991. Geologia do Deposito Aurífero Mina III, Crixás, Goiás, *Anais III Simp. Geol. Centro-Oeste*, SBG-NCO, p. 1-14.
- FORTES, P. T. F. O. et GIULIANI, G., 1993. Caracterização química da arsenopirita e do ouro nos corpos de minério do depósito aurífero Mina III, Crixás, Goiás, *Anais 4º Congr. Bras. Geoquím.*, SBGq, p. 161-163.
- FORTES, P. T. F. O. et TAKAKI, T., 1993. Estudo de isotopos de carbono e oxigênio em rochas encaixantes do depósito aurífero Mina III, Crixás, Goiás, *Anais 4º Cong. Bras. Geoquím.*, SBGq, p. 186-188.
- FRAPE, S. K. et FRITZ, P., 1987. Geochemical trends from groundwaters from the Canadian Shield, *Saline Water and Gases in Crystalline Rocks*, p. 19-38.
- GIULIANI, G., OLIVO, G. R., MARINI, O. J., MICHEL, D., 1993. The Santa Rita gold deposit in the Proterozoic Paranoá Group, Goiás, Brazil: an example of fluid mixing during ore deposition, *Ore Geol. Reviews*, 8/6, p. 503-523.
- HALL, D. L., STERNER, S. M., BODNAR, J., 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O, *Econ. Geol.*, 83, p. 197-202.
- JOST, H. et OLIVEIRA, A. M., 1991. Stratigraphy of the Greenstone Belts of the Crixás Region, Goiás, Central Brazil, *Journ. South Am. Earth Sci.*, 4, n° 3, p. 201-214.
- POTTER, R. W., CLYNNE, M. A. et BROWN, B. L., 1978. Freezing point depression of aqueous sodium chloride solution, *Econ. Geol.*, 73, p. 284-285.
- SABOIA, L. A., 1979. Os "Greenstone Belts" de Crixás e Goiás, GO, *Bol. Inf.*, n° 9, SBG-NCO, p. 43-72.
- THOMSON, M. L. et FYFE, W. S., 1990. The Crixás gold deposit, Brazil: thrust-related post-peak metamorphic gold mineralization of possible Brasiliano cycle, *Econ. Geol.*, 85, n° 5, p. 928-942.
- XAVIER, R. P., FOSTER, R. P., FALLICK, A. E. et ALDERTON, D. H., 1994. Potential fluid reservoirs for mesothermal gold deposits in the Rio Itapicuru Greenstone Belt, Bahia, Brazil, *Comunicaciones*, 45, p. 13-22.
- YAMAOKA, W. N. et ARAUJO, E. M., 1986. Mineralização de Ouro da "Mina III", XXXIV Cong. Bras. Geol., Bol. 2, SBG-GO, p. 77-78.