

# Inclusions fluides dans le socle du forage scientifique de Sancerre-Couy

Maurice PAGEL <sup>(1)</sup>

Mots-clés : Inclusion fluide, Filon, Carbonate, Roche métamorphique, <sup>18</sup>O <sup>16</sup>O, <sup>13</sup>C <sup>12</sup>C, Phase fluide, Socle.  
Cher département (Sondage GPF Sancerre-Couy).

Dans des carbonates filoniens du forage de Sancerre-Couy, les inclusions aqueuses biphasées contiennent des fluides de salinité très variable et leurs températures d'homogénéisation sont également très variables entre 60 et 315 °C. Les fluides de haute température (> 200 °C) sont, d'après les critères pétrographiques, contemporains du dépôt de la calcite. En tenant compte des valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  (SMOW) de + 10,8 à + 19,9 ‰ obtenues sur les cristaux de calcite et les températures déterminées par les inclusions fluides, les valeurs de  $\delta^{18}\text{O}$  (SMOW) du fluide sont nettement positives, très différentes des deux valeurs obtenues sur les eaux actuelles, soit - 6,8 et - 6,1 ‰. Ces fluides pourraient être liés à l'histoire rétro-morphique du socle et en particulier, pourraient correspondre à l'hydrothermalisme généré par le volcanisme stéphanien.

Dans les roches du socle, de nombreuses inclusions carboniques sont présentes avec des températures de fusion comprises entre - 56,6 et - 63 °C et des températures d'homogénéisation en phase liquide de + 6 à + 26 °C. Elles contiennent parfois du graphite très bien cristallisé. La fraction molaire en méthane déterminée en microspectroscopie Raman est inférieure à 25 %. Quelques inclusions aquocarboniques ont des températures d'homogénéisation de la phase carbonique très basses entre - 45 et - 30 °C. Enfin, de nombreuses inclusions carboniques ont décrépité et se sont rééquilibrées dans de nouvelles conditions P-T. Ces inclusions auraient pu être piégées dans des conditions de métamorphisme haute pression défini par J.-P. Burg *et al.* (1988) et rééquilibrées dans des conditions de basse pression et température élevée.

La présence d'inclusions biphasées aqueuses de salinité très variable et de températures d'homogénéisation également très variables (Th de 80 à 400 °C) montre que le socle a été percolé par une grande variété de fluides.

---

## Introduction

---

En dessous de 200 °C, l'évolution thermique des socles et les circulations de fluides, sous couverture sédimentaire, est le résultat de la superposition de deux

régimes, l'un associé à l'histoire thermotectonique du socle, l'autre résultant de l'enfouissement et des circulations fluides, postérieurement au dépôt de la couverture sédimentaire.

Le forage de Sancerre-Couy apparaît être un bon exemple pour étudier l'histoire thermique de la couverture et du socle. L'analyse des traces de fission dans les apatites a montré que des températures supérieures à 130 °C ont été enregistrées au Jurassique moyen à supérieur dans la partie supérieure du forage et à l'Éocène dans la partie profonde.

Une reconstitution des percolations a été associée à cette histoire thermique grâce à l'étude des inclusions fluides. Celle-ci a été réalisée de deux manières. D'abord grâce à l'étude des inclusions fluides dans les filonnets de carbonate, ensuite par l'étude des inclusions fluides dans les quartz des roches métamorphiques. Dans les filonnets de carbonate, il est possible de retrouver le fluide contemporain du dépôt mais aussi, en plan de fracture cicatrisée, les inclusions qui sont les témoins des circulations postérieures. Dans les quartz des roches du socle, les inclusions sont très nombreuses, en nombre et en génération. Elles correspondent aux différents épisodes enregistrés depuis le métamorphisme jusqu'aux fracturations les plus récentes. Le but de ce travail n'a pas été de réaliser une reconstitution géothermique du métamorphisme mais a été de déterminer la nature des différents fluides qui ont percolé dans le socle.

---

## Cadre géologique régional et échantillonnage

---

Le forage de Sancerre-Couy est situé au sud du Bassin parisien entre Bourges et La Charité-sur-Loire. Ce forage traverse la couverture sédimentaire jusqu'à une profondeur de 940 mètres. En dessous de cette cote, le forage entre dans les formations métamorphiques, gneissiques et amphibolitiques, du soubassement du bassin de Paris.

La couverture sédimentaire est composée essentiellement de roches carbonatées, au milieu desquelles

(1) CREGU et GS CNRS-CREGU, Vandœuvre-lès-Nancy.

s'intercalent quelques rares niveaux gréseux. La base de la série est représentée par une quinzaine de mètres de roches volcaniques et sédimentaires rapportées au Stéphanien.

Entre 940 et 1 700 mètres, certains niveaux présentent de nombreuses fractures et des filonnets à l'intérieur desquels une cimentation carbonatée s'est développée. A plus grande profondeur, les filonnets sont beaucoup plus rares. Dans les fractures ouvertes, des cristaux automorphes de carbonate de taille centimétrique sont observés. Dans certains filons, les carbonates sont associés à des sulfures de type pyrite, chalcopryrite, marcasite. La cimentation carbonatée associée aux sulfures dans de nombreux filons, reflète la présence d'un hydrothermalisme important. Les inclusions fluides ont été étudiées dans ces carbonates afin de déterminer si cet hydrothermalisme est lié à la circulation d'un ou de plusieurs fluides différents et de quantifier les températures minimales de piégeage de ces fluides.

## Méthodes analytiques

Les inclusions fluides ont été étudiées sur lames polies sur les deux faces, environ 300 microns d'épaisseur, avec une platine chauffante et réfrigérante Chaix-meca (Poty *et al.*, 1976). Cette platine a été calibrée avec des inclusions naturelles et synthétiques et des produits chimiques de point de fusion connu.

Des analyses ont été également réalisées en utilisant un spectromètre Raman Dilor (J. Dubessy *et al.*, 1989).

Pour le dosage des isotopes de l'oxygène et du carbone dans les cristaux de calcite, la procédure classique d'attaque par l'acide phosphorique sous vide a été utilisée (J.-M. Mac Crea, 1950). Le CO<sub>2</sub> gaz est ensuite analysé par spectrométrie de masse. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire de la Société Elf Aquitaine à Pau.

## Filonnets de calcite

### — Analyse microthermométrie des inclusions fluides

L'étude microthermométrie a été réalisée sur les inclusions fluides biphasées présentes dans les cristaux de carbonate situés dans de petits filonnets à trois niveaux (1 005, 1 047,8 et 1 066,9 m).

Les résultats microthermométriques, températures de fusion et températures d'homogénéisation, sont présentés dans la figure 1.

Pour l'échantillon prélevé à 1 005 m, les températures d'homogénéisation en phase liquide sont comprises entre 80 et 250 °C. Les températures de fusion sont comprises entre -17 et 0 °C. Ces dernières présentent trois populations d'inclusions en terme de salinité, dont les pourcentages en eq. poids NaCl se trouvent regroupés autour de 20, 15 et moins de quatre.

Pour l'échantillon prélevé à 1 047,8 m, les températures d'homogénéisation sont comprises entre 60 et 315 °C. Toutefois, les mesures se regroupent autour de

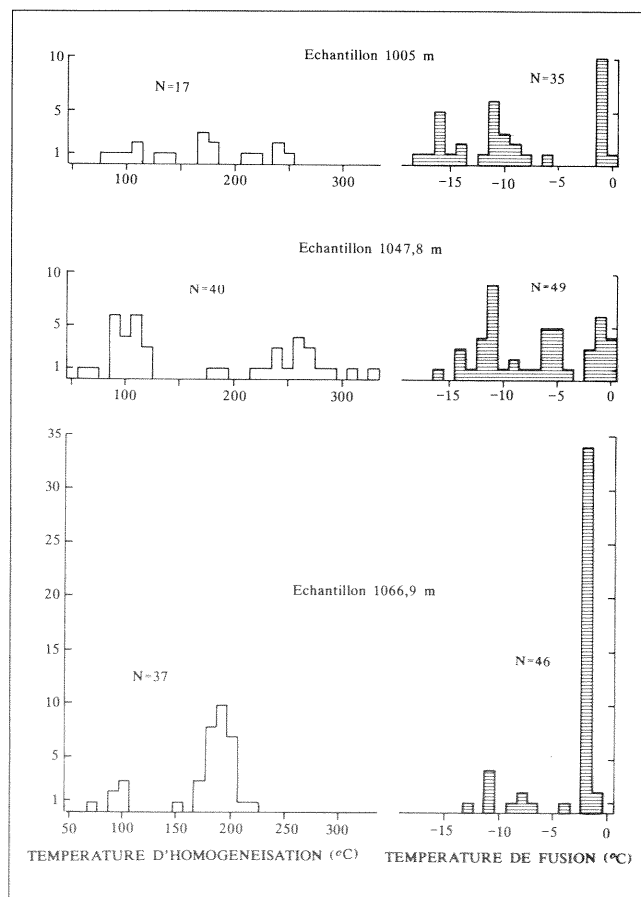


Fig. 1. - Histogrammes des températures de fusion et d'homogénéisation des inclusions aqueuses biphasées contenues dans les cristaux de calcite de trois échantillons situés aux profondeurs respectives suivantes : 1 005, 1 047,8 et 1 066,9 m.

deux populations assez bien définies. L'une est centrée à 100-110 °C, l'autre est plus étalée mais la température moyenne peut être estimée autour de 250 °C. Les températures de fusion sont comprises entre -16 et 0 °C.

Pour l'échantillon situé à 1 066,9 m, les températures d'homogénéisation sont comprises entre 70 et 210 °C. Toutefois, ces températures définissent une population d'inclusions dont la température moyenne est de l'ordre de 190 °C. Quelques rares inclusions présentent des températures d'homogénéisation plus basses, vers 100 °C. Les températures de fusion varient entre -13 et 0 °C mais la majorité des inclusions présente des températures de fusion regroupées autour de -1 °C.

L'origine de la forte variation des températures de fusion et des températures d'homogénéisation peut être étudiée en associant les deux données (fig. 2). Plusieurs groupes d'inclusions sont ainsi individualisés, différents d'un échantillon à l'autre.

Pour l'échantillon prélevé à 1 047,8 m, les inclusions définissent trois zones. La première correspond à un fluide chaud, dont les températures sont comprises entre 200 et 300 °C pour des salinités variant de 8 à 15 % eq. poids NaCl. Ces salinités présentent des valeurs intermédiaires à celles observées pour les fluides de plus basse température regroupées autour de 100 °C. L'un des deux fluides de basse température présente des salinités inférieures à 4 % eq. poids NaCl, l'autre, des salinités supérieures à 15 % eq. poids NaCl.

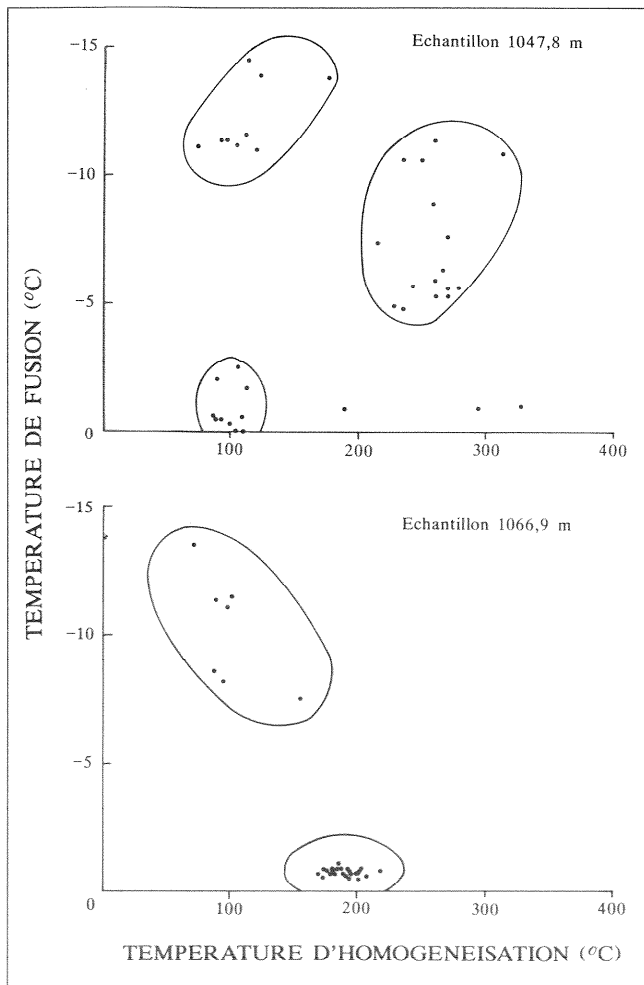


Fig. 2. - Relation entre la température de fusion et la température d'homogénéisation pour les inclusions aqueuses biphasées contenues dans les cristaux de calcite de trois échantillons situés aux profondeurs suivantes : 1 005, 1 047,8 et 1 066,9 m.

En revanche, dans l'échantillon situé à 1 066,9 m, les inclusions sont réparties en deux groupes. Un fluide d'une température de 200 °C et présentant des salinités inférieures à 3 % eq. poids NaCl ainsi qu'un autre fluide dont les salinités sont plus élevées (entre 8 et 20 % eq. poids NaCl) mais avec des températures d'homogénéisation plus basses, regroupées autour de 100 °C.

L'analyse des inclusions fluides dans les carbonates filoniens du forage de Sancerre-Couy, permet de conclure à l'existence de plusieurs générations de fluides de salinité très différente.

L'étude pétrographique des inclusions fluides met en évidence la présence d'inclusions primaires et d'inclusions secondaires dans les fractures recristallisées des carbonates. Ainsi, le fluide de haute température (> 160 °C) a été relié aux inclusions fluides primaires, donnant alors une température minimale de formation des carbonates filoniens étudiés.

L'analyse par traces de fission a montré que des températures élevées, supérieures à 130 °C, ont été enregistrées dans le socle après le dépôt de la couverture sédimentaire. Il est donc envisageable de considérer qu'au moins une partie des fluides observés dans les cristaux de calcite puissent être issus des sédiments.

L'analyse des isotopes du carbone et de l'oxygène des carbonates peut permettre de tester cette hypothèse car, connaissant la gamme de températures de cristallisation des carbonates, il est possible d'évaluer la composition isotopique du fluide. De plus, ces données pourront être replacées par rapport au travail de A.-M. Fouillac et D. Beaufort (1991) qui ont analysé 32 échantillons entre 946 et 3 457 mètres.

### — Géochimie isotopique des carbonates

Neuf échantillons localisés entre 1 005 et 1 459 mètres ont été analysés pour les isotopes du carbone et de l'oxygène. Les valeurs des compositions isotopiques sont reportées dans le tableau I. Les  $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  ont des valeurs comprises entre -9,3 ‰ et -3,6 ‰ (le domaine défini par A.-M. Fouillac et D. Beaufort est de -15,1 à -5,9 ‰). Les  $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$  obtenus varient entre +10,8 ‰ et +19,9 ‰ (le domaine défini par A.-M. Fouillac et D. Beaufort est de +7,9 à +22,9 ‰). Sur l'échantillon 1 058,3 deux prélèvements réalisés au centre et en bordure d'un cristal de calcite montrent une variation significative de  $\delta^{18}\text{O}$  de +18,9 à +16 ‰ tandis que le  $\delta^{13}\text{C}$  ne varie pas.

Profondeur mètres	$\delta^{13}\text{C}$ ‰ calcite	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ calcite	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ fluide 200 °C	$\delta^{18}\text{O}$ ‰ fluide 300 °C
1 005	-8,9	19,9	10,3	14,3
1 058,3A	-8,9	18,9	9,3	13,3
1 058,3B	-8,9	16,0	6,3	10,3
1 066,9	-8,9	10,8	1,2	5,2
1 074,8	-3,6	18,2	8,6	12,6
1 164,5	-7,7	19,6	10,0	14,0
1 220,3	-7,0	18,0	8,3	12,3
1 221,2	-5,5	17,0	7,4	11,4
1 355	-6,8	17,2	7,6	11,6
1 459,2	-9,3	17,5	7,8	11,8

A : bordure du cristal  
B : centre du cristal

Tableau I : Données isotopiques  $\delta^{13}\text{C}$  (PDB) et  $\delta^{18}\text{O}$  (SMOW) sur les calcites des filonnets et des brèches du forage de Sancerre-Couy. Valeur en  $\delta^{18}\text{O}$  du fluide calculée pour des températures d'équilibre de 200 et 300 °C.

Dans un diagramme où sont reportés les  $\delta^{18}\text{O}$  en fonction des  $\delta^{13}\text{C}$ , les valeurs isotopiques des carbonates filoniens de Sancerre-Couy sont relativement bien groupées et montrent que ces carbonates ont une origine commune (fig. 3) à l'exception de l'échantillon 1 066,9 dont la valeur  $\delta^{18}\text{O}$  est plus basse. Les premiers correspondent au groupe D de A.-M. Fouillac et D. Beaufort (1991) alors que le dernier serait relié au groupe G.

A l'équilibre isotopique, le fractionnement de  $\delta^{18}\text{O}$  entre carbonate et eau dépend de la température. Connaissant la température de formation des carbonates par l'étude des inclusions fluides primaires, il est possible d'en déduire la composition isotopique de l'oxygène de l'eau au moment de leur cristallisation. La

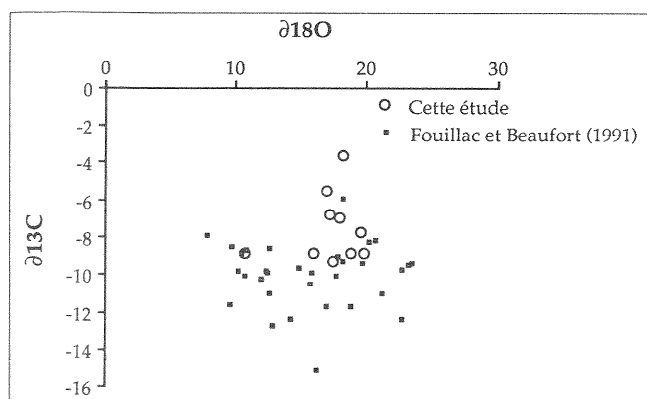


Fig. 3. - Relation entre le  $\delta^{13}\text{C}$  et le  $\delta^{18}\text{O}$  des carbonates obtenus dans cette étude et dans le travail de A.-M. Fouillac et D. Beaufort (1991).

○ Cette étude.  
■ Fouillac et Beaufort (1991).

formule employée est celle donnée par J. Friedman et J.-R. O'Neil (1977) :

$$10^3 \ln \alpha (\text{calcite-eau}) = 2,78 \cdot 10^6 \text{ T}^{-2} - 2,89$$

Les résultats sont présentés dans le tableau I. Les calculs ont été réalisés en prenant 200 et 300 °C pour la formation des carbonates. Les  $\delta^{18}\text{O}$  SMOW, obtenus à 200 °C, sont compris entre + 1,2 et + 10,3 ‰. A 300 °C, les valeurs isotopiques varient entre + 5,2 et + 14,3 ‰. Elles sont donc très nettement différentes de celles obtenues sur les eaux actuelles qui sont de - 6,8 ‰ à - 558 m et de - 6,1 ‰ à 3 272 m (A.-M. Fouillac et D. Beaufort, 1991). Ces valeurs relativement élevées de  $\delta^{18}\text{O}$  seraient en accord avec l'hydrothermalisme généré par les phénomènes volcaniques du Stéphanien ou à des phénomènes rétro-morphiques antérieurs. Des arguments structuraux permettraient vraisemblablement de trancher.

En résumé, les compositions isotopiques de l'oxygène du fluide associé à la cristallisation des carbonates filoniens du forage de Sancerre-Couy, montrent que ce fluide est d'origine profonde avec des caractéristiques le rapprochant de fluide rétro-morphique. Dans de telles conditions, il apparaît difficile de relier la formation de ces carbonates à l'événement thermique fini-Jurassique déterminé par la méthode des traces de fission de l'uranium et de considérer l'origine du fluide carboné comme sédimentaire et/ou lié à la discordance socle-couverture. Par contre, les inclusions fluides de plus basses températures (autour de 100 °C) observées en plans dans les cristaux de calcite pourraient correspondre à des fracturations tardives liées aux événements se produisant après le dépôt des sédiments.

## Roches métamorphiques

L'étude microthermométrique a été réalisée sur six échantillons aux profondeurs suivantes : 1 070,1 ; 1 221,2 ; 2 368 ; 2 785,2 ; 2 900 et 3 240,5.

Trois types principaux d'inclusions ont été observés :

Type 1 : inclusions mono-à biphasées carboniques.

Type 2 : inclusions bi-à triphasées aquocarboniques.

Type 3 : inclusions aqueuses biphasées.

Type 4 : rares inclusions aqueuses monophasées.

Les inclusions de type 2 sont plus abondantes dans les deux échantillons les plus profonds et les inclusions de type 1 n'ont été observées que dans ces deux échantillons.

De plus, dans les échantillons profonds, il existe des inclusions qui présentent des figures de décrépitation (fig. 4).

### — Inclusions de type 1

Ces inclusions sont le plus souvent monophasées, parfois biphasées avec du  $\text{CO}_2$  liquide et une bulle de  $\text{CO}_2$  gaz. Des paillettes de graphite sont rarement présentes dans ces inclusions. Les principales données microthermométriques sont les suivantes :

- les températures de fusion de la phase carbonique sont comprises entre - 57° et - 63 °C ce qui indique la présence de constituants autres que le  $\text{CO}_2$  dont le point de fusion est de - 56,6 °C. Effectivement, l'analyse des inclusions carboniques par spectrométrie Raman montre que le gaz carbonique et le méthane sont dominants, l'azote n'est présent qu'à l'état de traces. La proportion molaire de méthane calculée sur quatre inclusions reste inférieure à 25 %. L'analyse du graphite montre qu'il est très bien organisé comme l'indique l'absence de la bande à 1 350  $\text{cm}^{-1}$  ;

- les températures d'homogénéisation en phase liquide sont très variables entre + 6 °C et + 26 °C ;

- il n'existe pas de relation évidente entre Th et Tf même si à l'échelle d'un même quartz il peut apparaître comme dans l'échantillon 2 990, une augmentation de Th lors de l'augmentation de Tf (fig. 5).

### — Inclusions de type 2

Ces inclusions contiennent une phase aqueuse liquide et une partie carbonique de volume variable. Ce volume peut contenir à 20 °C soit une phase carbonique liquide, soit une phase liquide et une phase vapeur.

- les températures de fusion de la phase carbonique sont comparables à celles qui ont été déterminées dans les inclusions carboniques monophasées, soit entre - 57 °C et - 61 °C. Dans l'échantillon 1 070,1, une température de fusion beaucoup plus basse a été obtenue à - 96,3 °C, indiquant vraisemblablement une proportion plus importante de méthane ;

- les températures d'homogénéisation des phases carboniques sont similaires à celles des inclusions monophasées carboniques à l'exception d'inclusions dont les phases carboniques s'homogénéisent entre - 45 et - 30 °C ;

- les températures d'homogénéisation totale des inclusions sont comprises entre 280 et 400 °C.

### — Inclusions de type 3

Les inclusions biphasées dans lesquelles il n'y a pas de démixion à l'intérieur de la bulle lors du refroidissement sont présentes dans tous les échantillons.

- les températures de fusion sont comprises entre - 0,3 °C et - 33,0 °C ;

- les températures d'homogénéisation sont comprises entre 80 et 400 °C.

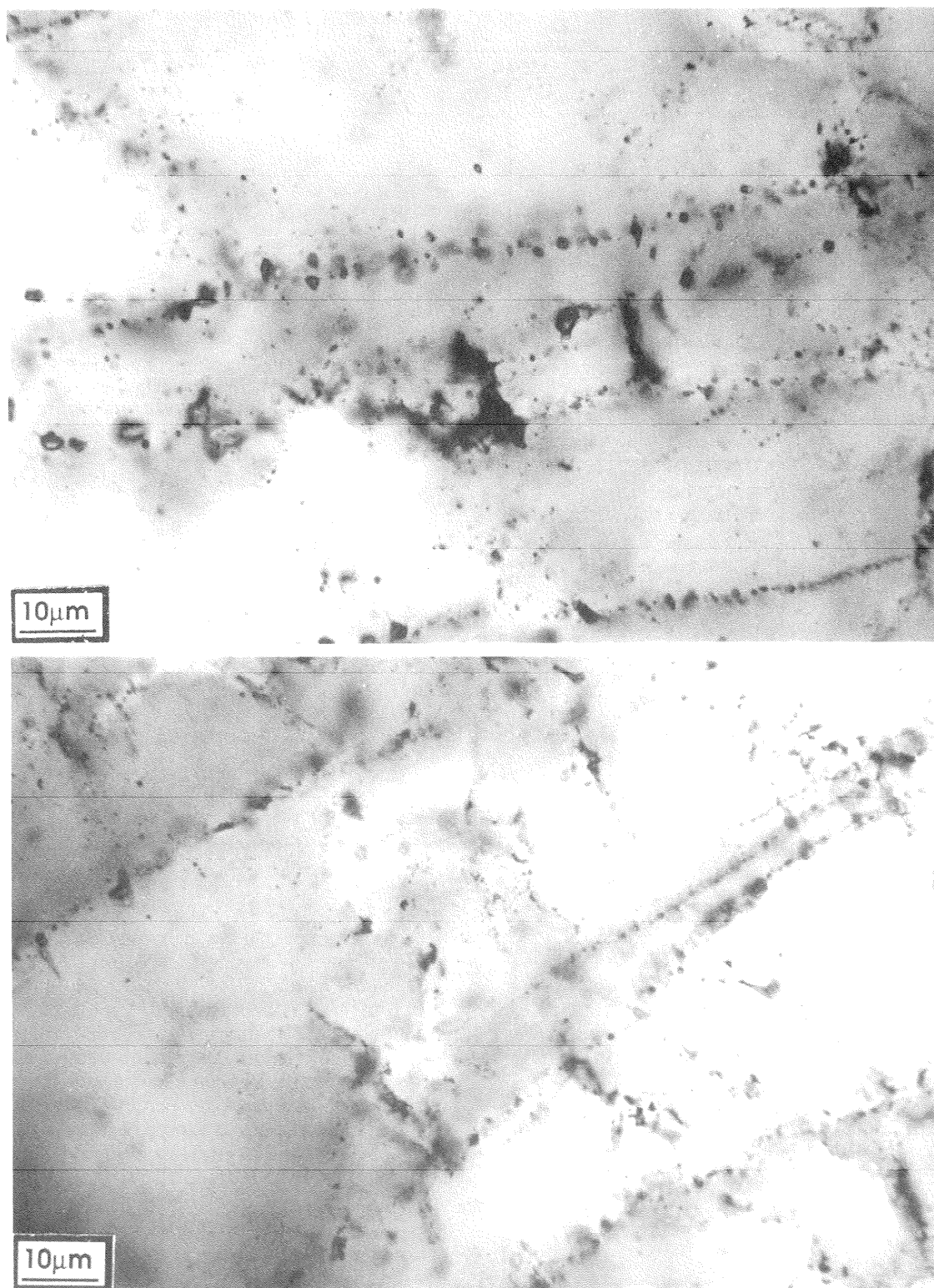


Fig. 4. -Inclusions décrépitées observées dans l'échantillon 3 240,5 m.

Dans un diagramme Th en fonction de Tf (fig. 6), il apparaît clairement que ces roches métamorphiques ont été percolées par des fluides de salinité différente.

#### — Inclusions de type 4

Ces inclusions monophasées aqueuses n'ont pas été étudiées en microthermométrie. Elles représentent le piégeage de fluide de basses températures, probablement inférieures à 70 °C. Elles ont donc pu se former avant (et pendant) le dépôt de la couverture sédimentaire.

#### Conclusions

Les résultats obtenus par l'analyse des inclusions fluides présentes dans les carbonates filoniens situés entre 1 005 et 1 459 mètres, mettent en évidence l'existence de plusieurs générations de fluides différents. Les inclusions fluides primaires ainsi que l'analyse isotopique de l'oxygène et du carbone sur des cristaux suggèrent que le fluide associé à leur cristallisation à une

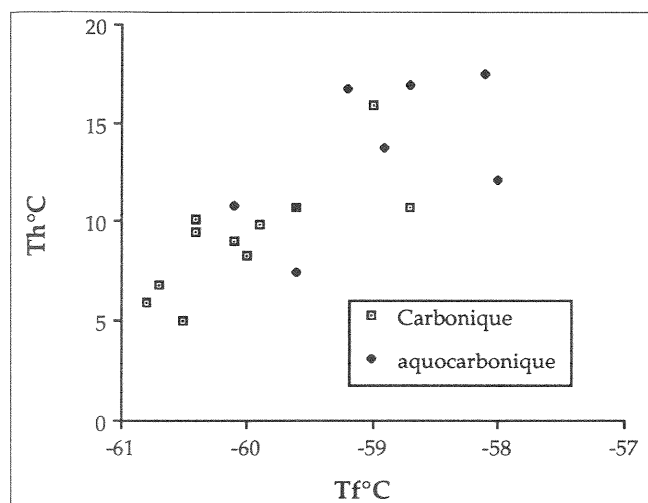
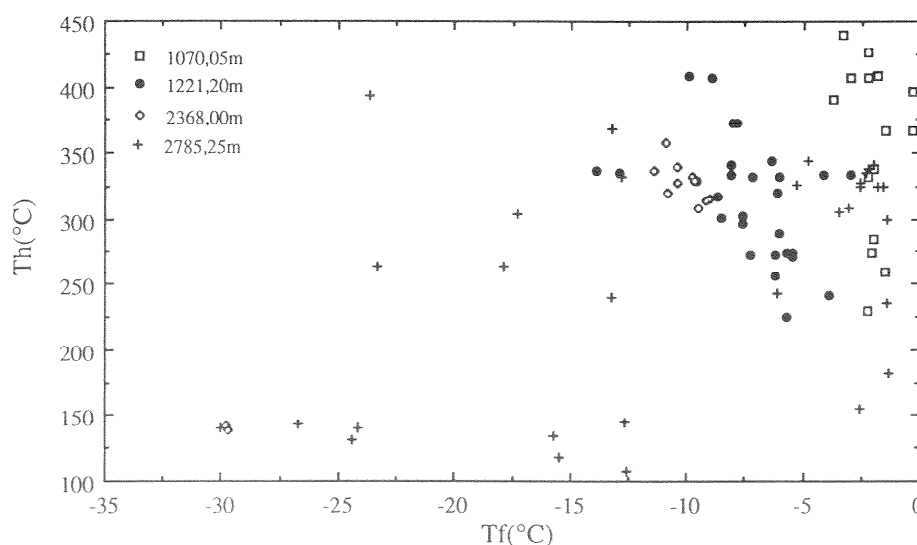


Fig. 5. - Relation entre la température d'homogénéisation en phase liquide et la température de fusion des inclusions carboniques dans une plage de l'échantillon 2 990.

□ Carbonique.  
◆ Aquocarbonique.

Fig. 6. - Relation entre la température de fusion et la température d'homogénéisation des inclusions aqueuses biphasées contenues dans les quartz des roches métamorphiques.



origine profonde avec des caractéristiques proches de fluide magmatique et/ou métamorphique. Ce fluide est vraisemblablement relié à un important épisode hydrothermal induit par un magmatisme basique daté au Stéphanien moyen vers 290-300 Ma (S. Costa et H. Maluski, 1988 ; S. Costa, 1990, A.-M. Hottin et J.-Y. Calvez, 1988).

Dans les quartz du socle, il existe des inclusions carboniques à  $\text{CO}_2$  et  $\text{CH}_4$  vraisemblablement liées à l'histoire rétro-morphique du socle. Les températures d'homogénéisation

obtenues sur ces inclusions carboniques permettent d'affirmer qu'elles ne sont pas formées lors du métamorphisme granulitique de haute pression défini par J.-P. Burg *et al.* (1988). Par contre, les inclusions décrépitées pourraient être interprétées comme indiquant la présence d'inclusions initiales à haute densité rééquilibrées lors de la baisse de pression à température équivalente ou même supérieure proposée par J.-P. Burg *et al.* (1988). L'intrusion profonde d'un corps basique dans des conditions peu profondes pourrait également entraîner la décrépitation des inclusions.

## Références

- BURG J.-P., KIENAST J.-R., HOTTIN A.-M., BOUTIN R., LEYRELOUP A., VEZAT R., BALE P., BODINIER J.-L., DUPUY C. (1988). - Résultats préliminaires de l'étude pétro-structurale sur le forage de Sancerre-Couy. Documents du BRGM, n° 137, pp. 155-174.
- COSTA S., MALUSKI H. (1988). - Datations par la méthode  $^{39}\text{Ar}$ - $^{40}\text{Ar}$  de matériel magmatique et métamorphique paléozoïque provenant du forage de Couy-Sancerre (Programme G.P.F.). *C.R. Acad. Sci. Fr.*, **306**, (2), pp. 351-356.
- COSTA S. (1990). - De la collision continentale à l'extension tardi-orogénique : 100 millions d'années d'histoire varisque dans le Massif Central Français, une étude chronologique par la méthode  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$ . Thèse Université de Montpellier.
- DUBESSY J., POTY B., RAMBÓZ C. (1989). - Advances in C-O-H-N-S

fluid geochemistry based on micro-Raman spectrometric analysis of fluide inclusions. *Eur. J. Mineral.*, **1**, pp. 517-534.

FOUILLAC A.-M., BEAUFORT D. (1991). - Étude minéralogique et isotopique ( $^{13}\text{C}$ ,  $^{18}\text{O}$ ) des carbonates néoformés dans le sondage profond de Sancerre-Couy (France). *Bull. Soc. géol. Fr.*, **162**, n° 5, pp. 939-945.

FRIEDMAN I., O'NEIL J.-R. (1977). - Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest, dans « Data Geochemistry », 6th, Ed. *Geol. Surv. Prof. Paper*, 440 K.

HOTTIN A.-M., CALVEZ J.-Y. (1988). - Résultats analytiques sur quelques minéraux du forage de Sancerre-Couy. Document du BRGM, n° 137, pp. 225-234.

MCCREA J.-M. (1950). - On the isotope chemistry of carbonates and a paleotemperature scale. *J. Chem. Phys.*, **18**, pp. 849-857.

POTY B., LEROY J., JACHIMOWICZ L. (1976). - Un nouvel appareil pour la mesure de températures sous le microscope, l'installation de microthermométrie Chaix-Meca. *Bull. Soc. Fr. Minéral. Cristallogr.*, **99**, pp. 182-186.