

LES INCLUSIONS FLUIDES DE QUARTZ FILONIENS D'ARDENNE¹

par

Anne DARIMONT²

(11 figures et 6 tableaux)

RESUME.- Des quartz filoniens échantillonnés le long de l'axe anticlinal de l'Ardenne, du Massif de Rocroi à l'Ouest au Massif de Stavelot à l'Est, ont été étudiés sous l'angle des inclusions fluides.

Les fluides détectés par microthermométrie et microsonde à effet Raman, appartiennent à plusieurs systèmes de composition : $H_2O-NaCl-CO_2-N_2$; $H_2O-NaCl$ et $N_2(-CO_2-CH_4)$.

Le fluide hétérogène, $H_2O-NaCl-CO_2-N_2$, est caractéristique des quartz des zones métamorphiques. Les conditions P-T de piégeage sont définies par la rencontre des isochores des fluides aqueux et carbonique : $P=1.8\text{Kbar}$ et $T=400^\circ\text{C}$; ce qui correspond à un gradient géothermique de $50^\circ\text{C}/\text{km}$, domaine de métamorphisme de haute température pour une pression modérée.

Le fluide homogène, $H_2O-NaCl-N_2-CO_2$, a été rencontré dans les zones non métamorphiques intermédiaires. Sa composition est proche de 96 % H_2O 2.8 % N_2 et 1.2 % CO_2 .

Les fluides aqueux sont omniprésents; leur densité varie d'Ouest en Est.

Le fluide azotique, $N_2(-CO_2-CH_4)$, a été décelé dans la région de Bastogne. La position de son isochore indique une faible pression de piégeage quelque soit la température.

L'origine des composants volatils est discutée eu égard à leur présence, leur abondance et leurs proportions relatives.

ABSTRACT.- Fluid inclusions have been studied which occur in quartz veins sampled along the Ardenne anticlinal axis from the Rocroi Massif in the west to the Stavelot Massif in the east.

The fluids detected by microthermometry and Raman microprobe, are represented in several composition systems : $H_2O-NaCl-CO_2-N_2$; $H_2O-NaCl$ and $N_2(-CO_2-CH_4)$.

The heterogeneous $H_2O-NaCl-CO_2-N_2$ fluid is a characteristic feature of the metamorphic zones. its depositional P-T conditions are determined by the crossing point of the aqueous and carbonic isochores, that's to say : $P=1.8\text{Kbar}$ and $T=400^\circ\text{C}$. This agrees with a geothermal gradient of $50^\circ\text{C}/\text{Km}$, a high temperature-low pressure metamorphic domain.

The homogeneous $H_2O-NaCl-N_2-CO_2$ fluid, was recognized in non-metamorphic intermediary zones. Its composition is close to 96 % H_2O 2.8 % N_2 and 1.2 % CO_2 .

Aqueous fluids are ubiquitous, their densities vary from west to east.

An azotic $N_2(-CO_2-CH_4)$ fluid is observed in the Bastogne area. His isochore's position indicates a low pressure depositional environment.

The origin of the volatile components is discussed with respect to their occurrence, abundance and relative proportions.

¹ Manuscrit déposé le 15 septembre 1986.

² Laboratoire de Géologie Appliquée, 45, avenue des Tilleuls, B-4000 Liège (Belgique).

INTRODUCTION

CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le sous-sol de la Belgique est essentiellement constitué de roches sédimentaires qui appartiennent à trois grands domaines séparés les uns des autres par des discordances de stratification majeures, dont les deux plus vieux sont :

- le socle ancien, d'âge cambro-ordovicien de types lithologiques phylladeux et quartzitique, qui affleure entre autre dans les massifs de Rocroi, Serpont et Stavelot (fig. 1);
- le socle jeune constitué par le Dévonien et le Carbonifère.

La tectonique calédonienne a plissé le socle ancien. Le style est caractérisé par des plis très aigus d'axes E-W, déversés vers le Nord. La tectonique varisque a affecté l'ensemble des roches paléozoïques; les roches dessinent une série de plis qui s'ordonnent en une succession d'anticlinoriums et synclinoriums, parmi lesquels on reconnaît l'anticlinorium de l'Ardenne. L'orientation générale de l'axe du plissement est E-W avec à l'Est du pays un redressement NE-SW (fig. 1).

La région plissée est coupée d'un grand nombre de failles longitudinales en relation avec le plissement ou de charriage, postérieures au plissement.

Rares sont les affleurements de roches éruptives. Ils sont localisés au flanc Sud des anticlinaux de premier ordre, tant en Ardenne qu'au Brabant (Beugnies, 1964). En Ardenne, on ne connaît que des intrusions en dyke, en sills et deux laccolites tonalitiques. Ces intrusions sont antérieures aux déformations tectoniques.

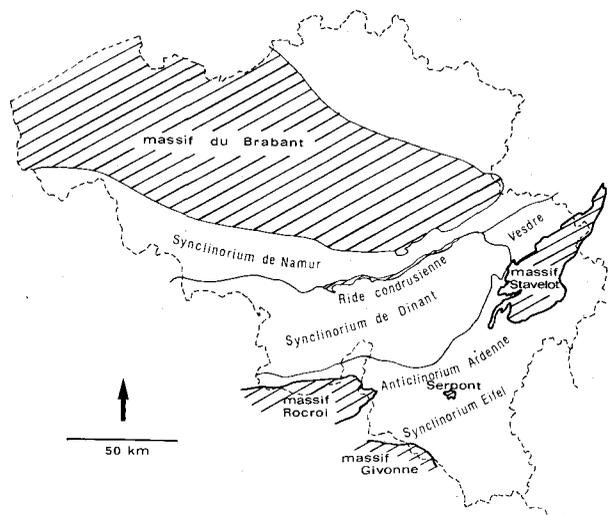


Fig. 1.- Localisation des massifs cambro-ordoviciens en hachuré; et unités tectoniques du Paléozoïque de Belgique.

Le métamorphisme a affecté deux zones situées le long de l'anticlinal de l'Ardenne (fig. 2) : au Nord-Est, la bordure Sud du Massif de Stavelot et au Sud, une bande qui s'étend du Massif de Rocroi à Bastogne. Ces zones sont à cheval sur les massifs calédoniens et le Dévonien inférieur. Il est d'âge varisque. Il n'a pas dépassé en intensité le faciès des schistes verts.

De nombreuses veines de quartz lardent les terrains dévoniens de la zone métamorphique de Bastogne (fig. 2) et les terrains cambriens des massifs de Rocroi et de Stavelot (fig. 1). Ces filons de quartz font l'objet de la présente recherche.

LES FILONS

L'étude des filons de quartz d'Ardenne conduit naturellement à aborder celle de l'évolution de leurs roches encaissantes et plus précisément leur évolution métamorphique.

Les roches paléozoïques sont plus évoluées dans la partie S-SE du pays : les sédiments pélitiques s'y retrouvent à l'état de phyllades. Il s'agit d'un effet régional, conséquence de la profondeur à laquelle se trouvent les roches au moment du plissement.

Deux zones particulières (fig. 2) sont caractérisées par l'apparition dans les roches de divers minéraux tels que l'ottrélite, la biotite, le grenat et l'amphibole. La cause de ce métamorphisme plus intense n'est pas expliquée. Il n'existe aucune relation évidente entre ce métamorphisme et les roches éruptives. Toutefois, le degré de métamorphisme exagéré (température élevée eu égard à des pressions modérées) et les paragenèses observées dans les filons de quartz laissent supposer à certains auteurs (Autun, 1971; Fourmarier *et al.*, 1968) qu'il y a eu intervention de phénomènes magmatiques.

Par contre, les adeptes de la sécrétion latérale (Michot, 1955) démontrent sur base d'études pétrographique et chimique, les influences réciproques roche-filon (métasomatisme à volume

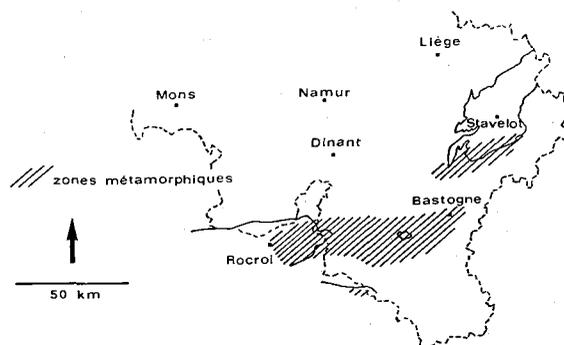


Fig. 2.- Les zones métamorphiques de Belgique.

constant), en admettant l'existence de venues hydrothermales. Michot (1955) distingue deux générations de chloritoïdes : la première résultant du métamorphisme régional est entourée d'une couronne liée à l'existence des filons de quartz qui traversent le Salmien et le Gedinnien.

Même s'il y a eu un métamorphisme régional lors de l'enfouissement, le métamorphisme qui a affecté l'anticlinal de l'Ardenne apparaît polyphasé (Beugnies *et al.*, 1981). Certaines veines de quartz syntectoniques pourraient être apparentées au stade ultime du métamorphisme. Il est d'ailleurs fréquent de rencontrer des paragenèses métamorphiques identiques dans le filon et dans l'encaissant.

CONDITIONS THERMOBAROMETRIQUES

Le métamorphisme en Ardenne allie une élévation importante de la température à une pression statique modérée (Antun, 1971). Cette opinion a été confirmée plus récemment par les travaux de Schreyer (1975), de Béthune (1977), Beugnies (1980 et 1981) et Fransolet & Kramm (1983).

- dans le Massif cambrien de Rocroi, la délimitation des zones métamorphiques est basée sur les paragenèses à chloritoïdes et ilménites (Beugnies, 1980) et à magnétite (Beugnies, 1981). Les températures atteintes lors du métamorphisme ne dépassent pas 350°C (absence d'andalou-site). Le passage d'une zone à hématite à une zone à hématite-magnétite puis à magnétite montre l'accroissement du degré métamorphique d'Ouest en Est. Les zones métamorphiques s'alignent sensiblement suivant l'axe du plissement.

- dans la région de Libramont, l'ordre d'apparition des minéraux néoformés peut résulter d'un métamorphisme occasionné par l'enfouissement géosynclinal à quelques 10 kilomètres de profondeur avec un degré géothermique de 40 à 45°C/km (de Béthune, 1977). Il y aurait formation de diopside vers 400°C et 2 Kbar (fig. 3). L'originalité de l'Ardenne réside dans le fait qu'il y a eu déshydratation puis décarbonatation au début de la tectogenèse hercynienne, sans grande élévation de température, c'est-à-dire sans dépasser les conditions du faciès des schistes verts (de Béthune, 1977).

- dans le Massif de Stavelot, l'identification précise des minéraux et l'étude des paragenèses ont plusieurs fois permis d'estimer les pressions et températures du métamorphisme, notamment : la stabilité du chloritoïde, $T > 380^\circ\text{C}$ (Fransolet *et al.*, 1977); l'ottrélite, $T = 360^\circ\text{C}$ à 400°C avec fO_2 élevée (Fransolet, 1978); la sudoïte en présence de quartz, $T = 350^\circ$ à 375°C et la limite de stabilité

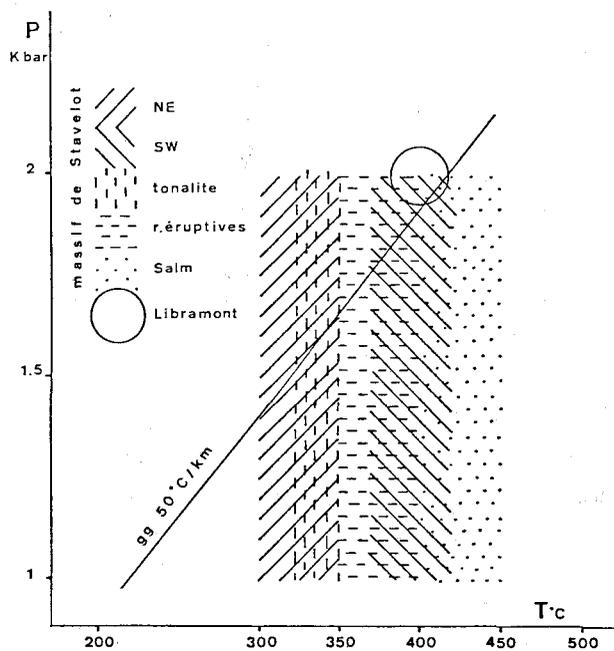


Fig. 3.- Représentation des conditions pression-température dans le massif de Stavelot (Fransolet *et al.*, 1983) et dans la région de Libramont (de Béthune, 1977).

andalou-site-cyanite, $P < 2,5$ Kbar (Fransolet *et al.*, 1984).

Sur base des paragenèses (Fransolet *et al.*, 1983), quatre domaines PT sont distingués (tabl. 1) :

1. le NE du Massif de Stavelot
2. la tonalité de la Helle
3. les roches éruptives du SW du Massif de Stavelot
4. le Sud du Massif de Stavelot.

Les températures de formation augmentent du NE vers le SW (fig. 3). Ces températures impliquent un enfouissement de 7 à 8 kilomètres de profondeur avec un gradient géothermique de 50°C/km.

L'ascension graduelle d'un magma dans la profondeur de la structure en dôme du massif pourrait être d'après Schreyer (1975) responsable de ce métamorphisme de température exagérée.

BUT DE LA RECHERCHE

L'étude des inclusions fluides réalisée dans les quartz d'Ardenne a été entreprise pour tenter de répondre à une série de questions qui concernent la composition des fluides minéralisateurs, la distribution géographique des fluides, la relation entre les filons de quartz et les roches encaissantes, la filiation à d'éventuels phénomènes éruptifs, les conditions de mise en place (P-T), le rapport entre ces veines de quartz et le métamorphisme.

Tableau 1.- Données P-T pour le Massif de Stavelot (Fransolet & Kramm, 1983).

ZONES	TEMPERATURES		PRESSIONS		METHODE UTILISEE pour les T ^{OS}
	min.	max.	min.	max.	
1 NE Stavelot	300°C	350°C	1 Kb	2 Kb	pumpellite + qz \rightleftharpoons épidote + prehnite + chlorite (NITSCH, 1971) (1)
2 Tonalite Helle	320°C	350°C	1 Kb	2 Kb	(1) et prehnite + chlorite + qz \rightleftharpoons épidote + actinote (NITSCH, 1971) (2)
3 r. éruptives SW Stavelot	350°C	400°C	1 Kb	2 Kb	(2) et Mn-chlorite + qz \rightleftharpoons spessartine + eau (HSU, 1968) (3)
4 Sud Stavelot	370°C	420°C	1 Kb	2 Kb	pyrophyllite \rightleftharpoons disthène + qz + eau (HAAS et HOLDAWAY, 1973) (4) et rhodocrosite + qz \rightleftharpoons pyroxmangit + CO ₂ (CANDIA et al., 1975)

P_{min} = 1 Kbar : équilibre Mn-cordiérite \rightleftharpoons spessartine + andalousite + eau (DASGUPTA et al., 1974)

P_{max} = 2 Kbar : (1) et (2) et prehnite + chlorite \rightleftharpoons pumpellite + actinote + quartz (NITSCH, 1971)
andalousite \rightleftharpoons disthène (HOLDAWAY, 1971)

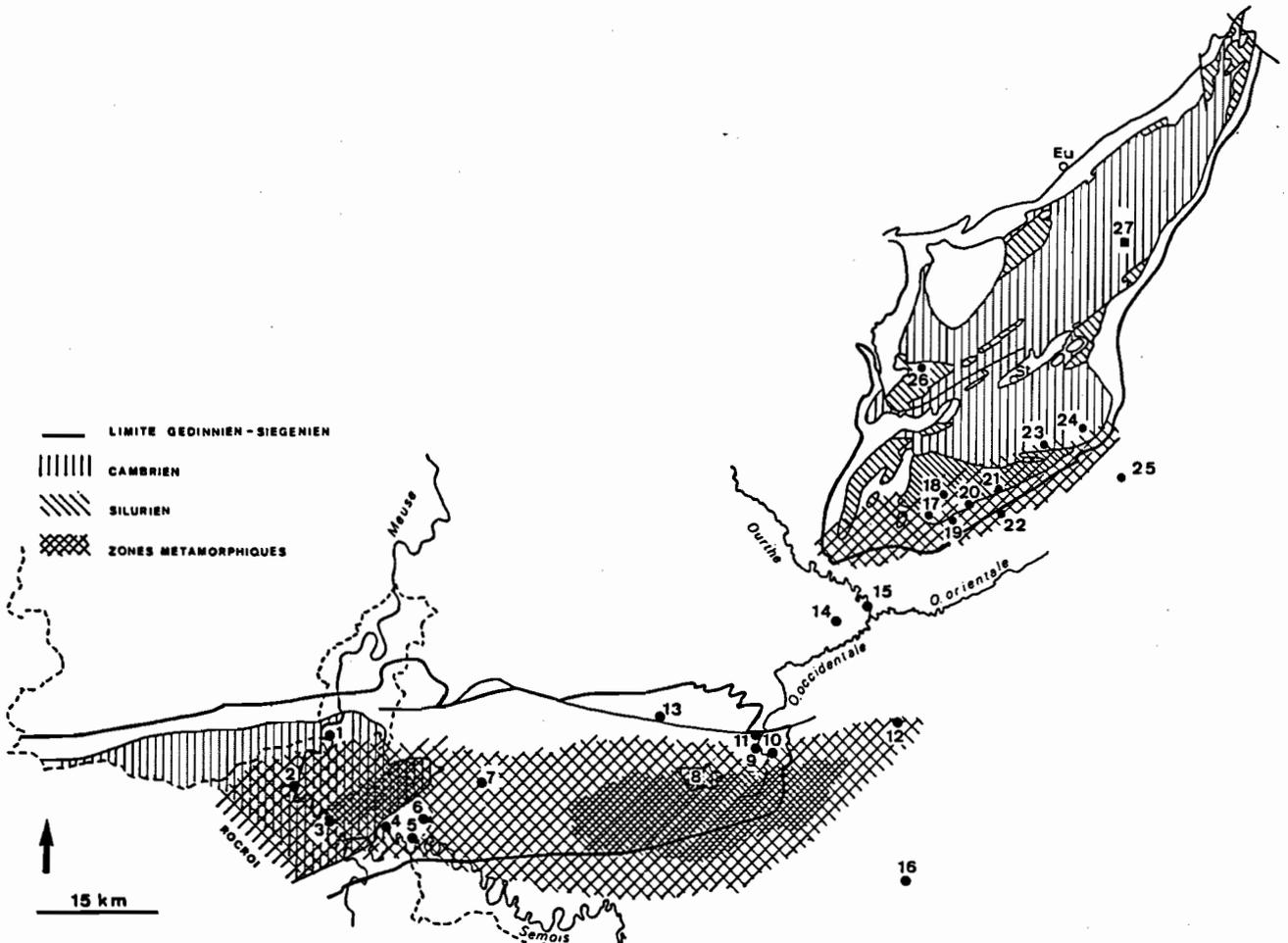


Fig. 4.- Localisation des échantillons dans l'aire anticlinale de l'Ardenne (voir tableau 2).

Tableau 2.- Description des échantillons.

N°	Carte topo 1/25000	Coord. Lambert	roche en- caissante	occurrence	échantillon	type	biblio.
QR1 Fumay	63/1-2	173.3-76.2	Devollien	faille post S ₁ S ₂ dans quartzites (dm)	qz blanc	"faille tardive"	Beugnies 1973
QR2 Revin	63/1-2	170.2-69.5	Revinien	qz exsudation dans diabase anté S ₁	qz blanchâtre	"secrétion"	Beugnies 1973
QR3 Mairupt	France		Revinien	microgranite	qz blanc	"magmatique"	Beugnies 1973
QR4 Nohan	63/7-8	182.2-64.7	Gedinnien	fracture post S ₁ anté S ₂ dans phyllades (cm)	qz laiteux	"faille hercynienne"	Beugnies 1982
QR5 Charmaie	63/7-8	184.6-65.2	Gedinnien	faille post S ₁ S ₂ (cm)	qz + hm + chlorite + oxydes Mn	"faille tardive"	
QR6 Rayères	63/7-8	184-66.3	Gedinnien	faille post S ₁ anté S ₂ (cm)	qz blanchâtre	"faille hercynienne"	Beugnies 1982
QR7 Ste Marie	65/1-2	226.5-68.3	Gedinnien	"quartzitine"	qz transparent	roche métam.	
QR8 Serpont	65/3-4	220.2-71	Cambrien	lentilles dans schistes noirs (cm)	qz + chlorite + ms		Corin 1932
QR9 Remagne	65/1-2	229.8-74.5	Gedinnien	filon dm dans phyllades à magnétite	qz + chlorite + gn + feld + biotite		
QR10 Lorette	65/1-2	229.8-75.15	Gedinnien	filonnet cm	qz blanc avec tourmaline aux épointes	"sécr. latérale"	Corin 1931 Corin 1932
QR11 Moircy	65/1-2	230-77.3	Gedinnien	lentilles dans schistes (cm)	qz laiteux + chlorite + Mn	"faille tardive"	
QR12 Bastogne	60/7-8	247.9-78.4	Siegenien	lentilles dans quartzites (cm)	qz blanc à "bastonite" et plagio	"filon pegmatitique"	Corin 1931 Lambert 1973
QN13 Poix St Hubert	59/7-8	216.2-78.9	Gedinnien	filon de qz dans schistes bigarrés	qz à chlorite		Fontignie 1973
QN14 Ortho	60/1-2	238.2-89.1	Siegenien	filon E-W métrique	qz laiteux + géodes de qz transparent		Brumagne 1963
QN15 Misramont	60/3-4	242.9-92.9	Siegenien	filon qz décimétrique	qz laiteux + Fe		Brumagne 1963
QN16 Martelange	65/7-8	248.6-59.1	Siegenien	filon qz dans ardoisière	qz transparent		
QS17 Regné	55/7-8	252.4-105.2	Salmien	collection	qz blanchâtre	"filon pegmatiti- que" à andalousite	Corin 1929
QS18 Colanhan	55/7-8	253.2-107.2	Salmien	collection	qz blanchâtre		
QS19 Bihain	55/7-8	253.5-103.9	Gedinnien	filon NE-SW dm	qz blanchâtre oxydes+chlorite	"filon hercy." à tourmaline	Lepersonne 1934
QS20 Ottre	55/7-8	255.2-104.85	Salmien	filon NE-SW à pyrophyllite ottrelite, davreuxite... cm	qz blanc laiteux	"filon hercy."	Fransolet 1978 Autun 1971
QS21 Salm	A 55/5-6 B 55/5-6	259.9-107.4 259.5-106.1	Salmien Gedinnien	filon qz à Cu cm à dm filon ds quartzite nodules carbonatés mm	qz blanc + hm qz + ankérite		Michot 1955
QS22 Bovigny	55/5-6	261.8-102.9	Siegenien	filon dans quartzites, dm	qz laiteux + chlorite	"hydroth."	Lepersonne 1934
QS23 Petit Thier	56/1-2	263-110.5	Salmien	collection	qz blanchâtre	"filon pneum." à tourmaline	de Rauw 1912
QS24 Recht	A 56/1-2 B 56/1-2	270.5-115 269-115.1	Salmien Salmien	collection collection	qz translucide qz translucide	filon à and. filon à albite et biotite	Corin 1934 Lepersonne 1934
QS25 Neidingen	56/3-4	275.2-109	Siegenien	collection	qz translucide	filon à albite et chlorite	Lepersonne 1932, 1933
QS26 Lienne	55/3-4	247- ?	Salmien	filon à Mn	qz transparent		Berger 1964
QS27 Helle	43/7-8	275.5-139.15	Cambrien	filon net qz dans tonalite, mm	qz à molybdénite		

ECHANTILLONNAGE

Les échantillons ont été prélevés le long de l'axe anticlinal de l'Ardenne, dans la zone métamorphique comprise entre le Massif de Rocroi et la région de Bastogne (QRn), dans la zone non métamorphique (QNn), dans la bordure Sud du Massif de Stavelot (QSn).

Les quartz de Revin (exsudation dans une diabase), du Mairupt (microgranite), de Sainte-Marie-Chevigny (quartzite) et de la Helle (tonalite) sont considérés comme matériaux de référence. Ils doivent fournir des inclusions typiques des fluides éruptifs ou métamorphiques.

Les autres quartz proviennent de filons d'épaisseur variable soit en zone métamorphique (QR4 à QR12 et QS17 à QS24) soit en zone non métamorphique (QN13 à QN16 et QS25 à QS26) (fig. 4).

La description des échantillons est faite au tableau 2. Y figurent les coordonnées Lambert sur carte topographique au 1/25.000 du site, l'âge des roches encaissantes, l'occurrence, le degré de transparence du quartz, le type de filon reconnu dans la littérature.

LES INCLUSIONS FLUIDES

METHODES

Deux méthodes d'investigation non-destructives ont été mises en oeuvre pour étudier les inclusions fluides : la microthermométrie et la microsonde à effet Raman.

En microthermométrie (Roedder, 1984), les températures de changements de phases suivantes sont enregistrées : la température eutecticale T_e renseigne sur la composition de la phase aqueuse; la température de fin de fusion T_f parfois influencée par la présence de clathrates (Collins, 1979), indique la salinité; la température de fusion du CO_2 ; la température de fusion du clathrate $T_{f,cl}$; la température d'homogénéisation T_h du CO_2 liquide et du CO_2 gazeux en une seule phase, liquide ou gazeuse; la température d'homogénéisation T_H , des fluides gazeux et liquide en une phase unique.

Grâce à la microsonde Raman (Delhaye *et al.*, 1975; Rosasco *et al.*, 1975), les rapports molaires des espèces CO_2 , N_2 et CH_4 ont pu être déterminés. Les sections efficaces ont été prises respectivement égales à 1,21, 1, 9 (Schrötter *et al.*, 1979) pour une raie excitatrice de 514.5 nm. La hauteur des pics relatifs à chaque espèce et les sections efficaces conduisent au calcul des rapports

molaires. Les nombres d'onde des constituants analysés sont : 1388 cm^{-1} pour le CO_2 , 2331 cm^{-1} pour l'azote et 2914 cm^{-1} pour le méthane. Les fractions molaires sont déduites des rapports molaires.

APPAREILLAGES

En microthermométrie, l'appareil est une platine Leitz 350, réfrigérante (-100°C) et chauffante ($+350^\circ\text{C}$), adaptée sur un microscope Ortholux à lumière transmise. Une platine Chaixmeca a été utilisée (Poty *et al.*, 1976) pour descendre en température jusqu'à -210°C , de façon à observer les températures de changements de phases de l'azote.

Deux types de microsonde à effet Raman ont été employés : une microsonde Mole (Jobin-Yvon) à détection multicanale autorisant l'intégration plus rapide des signaux faibles et leur accumulation. La source est un laser à Argon ionisé émettant la raie 514.5 nm avec une puissance de 50 mW (Université de Lille) à l'échantillon quand l'objectif 100x est en service ou une puissance de 300 à 600 mW (Université d'Amsterdam).

RESULTATS

Caractéristiques générales

A température ambiante, les inclusions fluides rencontrées dans les quartz d'Ardenne sont généralement biphasées, composées d'une bulle centrale gazeuse et d'une phase liquide en périphérie. Elles sont rarement triphasées; les trois phases rencontrées sont liquide $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ + liquide CO_2 + gaz CO_2 ou liquide $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ + gaz H_2O + solide NaCl .

La taille des inclusions se situe aux environs de 7μ et dépasse rarement 20μ , comme à Ortho (QN14) où les cavités montrent une grande dimension pouvant atteindre plusieurs dizaines de microns.

La forme des inclusions est parfois irrégulière, mais souvent géométrique subarrondie. Les contours sont losangiques, triangulaires ou en forme de cristal négatif.

La densité des inclusions varie d'un site à l'autre et d'un échantillon à l'autre. Les inclusions sont nombreuses au sens de Deicha (1976), c'est-à-dire que la distance moyenne entre les centres des cavités varie de 10 à 100μ ; ou fréquentes (100μ à 1 mm) ou rares ($>1\text{mm}$).

Les inclusions fluides sont isolées ou groupées, parfois alignées. Leur teinte passe du transparent au gris foncé ou au noir suivant la transparence du minéral hôte ou la composition du fluide inclus.

Tableau 3.- Description des inclusions fluides.

Type	Morphologie	Composition	TH en °C	D
A ₁		H ₂ O-NaCl-CO ₂ -N ₂	240 à > 300	0,9
A ₂		H ₂ O-NaCl-N ₂ -CO ₂	215 à 250	0,95
B ₁		H ₂ O-NaCl	240 à > 330	0,87
B ₂		H ₂ O-NaCl	150 à 240	0,87 à 0,93
B ₃		H ₂ O-NaCl	< 150	0,93
C		N ₂ -(CO ₂ -CH ₄)		0,31

Composition des fluides

Les compositions observées relèvent chimiquement des systèmes suivants :

- H₂O-NaCl-CO₂-N₂ type A
- H₂O-NaCl type B
- N₂-CO₂-CH₄ type C

Les inclusions du **type A** se composent à température ambiante d'un liquide aqueux périphérique et d'un gaz carbono-azotique central (tabl. 3). Quelques inclusions dont la température d'homogénéisation Th CO₂ est supérieure à la température ambiante se composent de trois phases. Parmi les inclusions du type A on peut distinguer deux sous-groupes : le premier est caractérisé par un volume du fluide carbono-azotique variable, la phase centrale pouvant occuper jusqu'à 90 % du volume total de l'inclusion; le méthane est parfois présent mais en quantité relativement négligeable par rapport au CO₂ et à N₂ (tabl. 4). Les inclusions de ce type A₁ montrent des températures de fusion du CO₂ comprises entre -72°C et -56,6°C. Les homogénéisations des phases carboniques s'opèrent en phase liquide (L) ou gazeuse (G) à des températures comprises entre -62°C et +23°C (tabl. 5). Quelques cas de sublimation sont observés. Les fractions molaires en azote ZN₂ de la phase carbono-azotique sont déduites du diagramme ZN₂-d (Darimont *et al.*, 1985). La dispersion des fractions molaires est confirmée par les analyses à la microsonde à effet Raman (tabl. 4).

La densité de la phase carbonique d varie de 0.09 à 1.06; le volume molaire \bar{v} est compris entre 375 et 37 cm³/mole (tabl. 5).

L'estimation visuelle des rapports volumiques des phases aqueuse et carbono-azotique, corrélée avec les densités partielles et les fractions molaires d'azote permet de calculer la composition globale des inclusions du type A₁ : XH₂O, XNaCl, XCO₂, XN₂ (tabl. 5).

Les densités globales D varient de 0.23 à 1.02 (tabl. 5), avec une fréquence plus grande entre 0.7 et 0.8 (fig. 5a); ce qui correspond à des volumes molaires de 250 à 19 cm³/mole, avec une plus grande fréquence autour de 30 cm³/mole (fig. 5b). Plus l'inclusion contient d'azote, plus le volume molaire augmente (fig. 5c).

Les inclusions dont la phase gazeuse contient plus de CO₂ que de N₂, présentent un fort taux de remplissage gazeux (fig. 6).

Les températures d'homogénéisation TH des fluides des inclusions du type A₁ sont généralement supérieures à 240°C; l'homogénéisation peut se produire en phase liquide ou gazeuse. La décrépitation est fréquente lors du chauffage, soit vers 260°C soit vers 310°C.

Le second type, A₂, a été mis en évidence grâce à la microsonde à effet Raman, dans des quartz différents de ceux qui contiennent la population A₁, comme QN13, QN14 et QN15. Bien qu'appartenant au même système de composition que les inclusions de type A₁, ces inclusions sont d'ailleurs différentes pour plusieurs raisons :

- la phase liquide aqueuse occupe toujours un volume important, > 0.8 (tabl. 3);
- la fraction molaire en azote est systématiquement supérieure à 0.72 (tabl. 4);
- le rapport molaire N₂/CO₂ de la phase gazeuse est presque constant;
- la phase carbono-azotique contient du méthane en faible quantité, ZCH₄ < 0.07.

Faute de données microthermométriques en dessous de -100°C, la densité globale n'a pu être qu'approchée. Pour un volume de la phase aqueuse estimé égal à 0.9 et une densité de la phase carbono-azotique voisine de 0.5, la densité globale de l'inclusion du type A₂ vaut 0.95. L'influence de la valeur de la densité de la phase carbono-azotique sur la densité globale du fluide est la suivante : pour une dN₂-CO₂ qui varie de 0.3 à 0.9, la densité globale D varie de 0.93 à 0.99. Pour fixer les idées, si vH₂O = 0.9, ZN₂ = 0.7 et dN₂-CO₂ = 0.5, le volume molaire global \bar{V} vaut 20 cm³/mole.

La composition des inclusions du type A₂ correspond à 96 % H₂O, 1.2 % CO₂ et 2.8 % N₂.

Les inclusions du **type B** de composition H₂O-NaCl, montrent des températures eutectiques T_e proches de -20°C. Les températures de fin de

Tableau 4.- Résultats à la microsonde à effet Raman (phase gazeuse).

N° Ech.	Z _{CO2}	Z _{N2}	Z _{CH4}	n	op*	N° Ech.	Z _{CO2}	Z _{N2}	Z _{CH4}	n	op*
QS17	0,30	0,70	nd	1	Dh	QR 1	nd	nd	nd	3	Dh
	0,26	0,74	nd	1	Bu	QR 2	nd	nd	nd	3	Dh
	0,26	0,74	nd	1	Bu	QR 3	nd	nd	nd	2	Dh
	nd	nd	nd	1	Dh	QR 4	nd	nd	nd	2	Dh
	nd	nd	nd	2	Bu	QR 7	0,46	0,54	nd	1	Dh
QS18	nd	nd	nd	2	Bu		nd	nd	nd	1	Dh
QS19	0,4	0,6	nd	1	Dh	QR 8	nd	nd	nd	4	Dh
	0,92	0,07	0,004	1	Dh	QR 9	nd	nd	nd	6	Bu
	nd	nd	nd	1	Dh	QR12	0,71	0,26	0,03	1	Dh
QS20	0,25	0,75	nd	1	Dh		0,57	0,39	0,04	1	Dh
	0,60	0,40	nd	1	Dh		0,60	0,34	0,06	1	Bu
	0,80	0,20	nd	1	Dh		0,03	0,96	0,01	1	Bu
	0,70	0,30	nd	1	Dh		0,39	0,56	0,05	1	Bu
	0,38	0,62	nd	1	Dh		0,44	0,52	0,04	1	Bu
	nd	nd	nd	3	Dh		0,05	0,93	0,02	1	Bu
QS21	0,78	0,22	nd	1	Dh		0	0,99	0,01	1	Bu
	0,78	0,22	nd	1	Dh		0,03	0,95	0,02	1	Bu
	0,79	0,21	nd	1	Dh		0	0,99	0,01	1	Bu
	0,76	0,24	nd	1	Dh		0	0,99	0,01	1	Bu
	0,76	0,24	nd	1	Dh	QN13	nd	1	nd	5	Bu
	nd	nd	nd	3	Dh		0,27	0,73	nd	1	Bu
QS23	0,58	0,42	nd	1	Bu		nd	nd	nd	2	Bu
	0,55	0,45	nd	1	Bu		nd	nd	nd	3	Dh
QS24A	0,58	0,42	nd	1	Bu	QN14	0,21	0,76	0,03	1	Dh
	0,45	0,55	nd	1	Bu		0,18	0,82	nd	1	Dh
	0,51	0,49	nd	1	Bu		0,27	0,72	0,01	1	Dh
	0,57	0,43	nd	1	Bu		0,17	0,76	0,07	1	Bu
	0,58	0,42	nd	1	Bu		nd	nd	nd	3	Dh
	nd	nd	nd	1	Bu	QN15	0,16	0,82	0,02	1	Dh
QS24B	nd	nd	nd	3	Bu		0,15	0,83	0,02	1	Bu
QS26	0,69	0,31	nd	1	Bu		nd	nd	nd	4	Dh
	nd	nd	nd	2	Bu		nd	nd	nd	3	Bu

n = nombre d'essais nd = non détecté

* op = opérateur : Dh : P. Dhamelincourt à Lille

Bu : Burke à Amsterdam

fusion Tf sont comprises entre -5° et -1°C et correspondent à des salinités de deux ordres de grandeur : < 5 % éq.poids NaCl et +/- 25 % éq.poids NaCl.

Les faibles salinités sont suggérées par la forte diminution voire même la disparition de la bulle de gaz lors de la congélation. Les fortes salinités sont confirmées par la forme de certaines cavités qui témoigne de la présence d'un cube de sel. L'indice de réfraction de NaCl, pratiquement égal à celui du quartz rend la détection du sel accolé aux parois de l'inclusion, très délicate. Des cubes de sel sont toutefois parfois identifiables, grâce à un grossissement de 50x à l'objectif, dans le liquide de l'inclusion.

Trois sous-groupes d'inclusions aqueuses peuvent être distingués sur base de leur position dans le minéral et de leurs températures d'homogénéisation : B₁, B₂, B₃ (fig. 7).

Les inclusions du type B₁ sont associées aux inclusions du type A₁. Elles ont même taille, même forme, même position dans le quartz; elles sont aussi caractérisées par des taux de remplissage gaz/liquide variables; mais ne contiennent pas de CO₂. Les températures d'homogénéisation sont dispersées de 240° à plus de 300°C. Les homogénéisations se produisent en phase liquide; quelques homogénéisations en phase gazeuse ont été observées.

Tableau 5.- Compositions des inclusions du type A, à partir des données microthermométriques.

Echantillon	Tf _{CO2} °C	Th _{CO2} °C	v _{H2O}	Z _{N2}	X _{H2O} %	X _{NaCl} %	X _{CO2} %	X _{N2} %	d	D	\bar{v} cm ³	\bar{V} cm ³
QS17 a	- 61	sub	0,60	0,86	90,0	2,4	1,1	6,5	.14	.66	300	41
b	- 61	- 50 G	0,40	0,80	85,0	2,2	2,6	10,2	.12	.47	260	50
c	- 60	sub	0,25	0,83	79,9	2,1	3,0	15,0	.09	.32	375	83
d	- 62,5	- 62 G	0,60	0,85	89,2	2,3	1,3	7,2	.16	.66	210	35
e	- 59	+ 14 L	0,50	0,16	76,7	2,0	17,9	3,4	.61	.81	70	29
f	- 65	- 20 L	0,30	0,50	54,0	1,4	22,3	22,3	.59	.71	69	41
QS19 a	- 58	+ 21 L	0,35	0,12	67,9	1,4	27,0	3,7	.55	.71	75	35
b	- 58	+ 9 L	0,50	0,11	73,8	1,5	22,0	2,7	.76	.88	54	27
c	- 58	+ 21 L	0,82	0,12	93,2	1,9	4,4	0,6	.55	.92	77	21
d	- 58	+ 21 L	0,40	0,12	72,7	0,8	23,4	3,2	.55	.73	77	33
e	- 58	+ 21 L	0,30	0,12	63,1	1,0	31,6	4,3	.55	.69	77	39
QS20 a	- 58	- 8 L	0,90	0,088	95,0	1,0	3,7	0,3	.90	.99	46	19
b	- 60,5	sub	0,15	0,85	64,3	6,4	4,4	24,9	.09	.23	320	106
QS21 a	- 59	+ 7 L	0,50	0,15	74,2	1,5	20,7	3,6	.73	.86	55	27
b	- 59	+ 12 G	0,60	0,23	89,3	1,8	6,9	2,0	.31	.72	134	28
c	- 60	+ 10 L	0,60	0,22	82,9	1,7	12,0	3,4	.58	.83	72	26
d	- 58,5	+ 12,5L	0,30	0,13	58,6	1,2	35,0	5,2	.66	.76	60	35
e	- 61	+ 12 L	0,33	0,28	65,4	1,3	23,9	9,4	.51	.67	80	39
f	- 58,5	+ 10 L	0,20	0,12	43,9	0,9	48,6	6,6	.71	.77	57	40
g	- 59	+ 10 L	0,40	0,15	67,7	1,3	26,2	4,6	.67	.80	60	31
h	- 58,5	+ 10 L	0,50	0,13	74,8	1,5	20,6	3,1	.71	.86	57	27
i	- 59	+ 10 L	0,60	0,15	82,1	1,3	14,1	2,5	.67	.87	60	25
j	- 56,5	+ 15 L	0	0			100,0		.81	.81	54	54
k	- 61	- 45 G	0	0,76			24,0	76,0	.13	.13	250	250
QS23 a	- 60	- 12 L	0,15	0,18	30,6	0,6	56,4	12,4	.86	.88	46	37
b	- 57	+ 7 L	0,50	0,05	72,7	1,5	24,5	1,3	.84	.92	50	26
c	- 62	- 62 L	0,60	0,23	73,6	1,5	19,2	5,7	1.06	1.02	37	23
QS24 a	- 59,5	+ 9 G	0,15	0,285	52,8	0,8	33,2	13,2	.31	.41	130	70
b	- 59,5	+ 4 L	0,15	0,175	34,4	0,5	53,7	11,4	.73	.77	55	42
c	- 60,5	+ 11 L	0,30	0,27	63,2	1,0	26,1	9,6	.49	.64	80	40
d	- 60	- 5 L	0,85	0,19	92,6	1,5	4,8	1,1	.78	.97	52	20
e	- 60,5	+ 5 G	0,15	0,34	48,0	0,7	33,8	17,5	.36	.46	103	61
f	- 60	+ 6 L	0,15	0,21	35,9	0,6	50,2	13,3	.66	.71	61	45
g	- 58	+ 9 L	0,40	0,10	66,0	1,1	29,6	3,3	.76	.86	54	30
h	- 58	+ 15 L	0,10	0,11	27,9	0,4	63,8	7,9	.65	.69	62	50
i	- 60	+ 15,5L	0,10	0,20	32,0	0,5	54,0	13,5	.50	.55	80	60
j	- 60	+ 15,5L	0,30	0,20	64,0	1	28,0	7,0	.50	.65	80	50
k	- 61	- 20 G	0,15	0,58	58,4	0,9	17,1	23,6	.19	.31	180	84
l	- 60	- 20 G	0	0,55	0	0	45,0	55,0	.15	.15	250	250
m	- 60,5	- 15 G	0,10	0,53	48,2	0,8	24,0	27,0	.19	.27	180	101
n	- 60,5	- 15 G	0,40	0,53	83,9	1,3	6,9	7,9	.19	.51	180	42
o	- 72	sub	0,20	0,80	31,4	0,5	13,6	54,5	.65	.72	45	36
p	- 59,5	+ 5 L	0,23	0,175	47,8	0,8	42,5	8,9	.71	.78	58	38
q	- 58	+ 9 L	0,30	0,10	55,9	0,9	38,9	4,3	.76	.83	54	34
r	- 60,5	+ 15 L	0,15	0,20	30,3	0,5	55,4	13,8	.50	.58	80	61
s	- 60	+ 6 L	0,20	0,19	40,1	0,7	48,0	11,2	.66	.73	61	43
t	- 61	+ 10 L	0,20	0,25	50,8	0,8	36,3	12,1	.54	.63	80	48
QS25 a	- 57	+ 23 L	0,85	0,05	94,6	0,9	4,3	0,2	.64	.95	70	20
b	- 57	+ 19 L	0,80	0,047	92,3	0,9	6,5	0,3	.70	.94	60	21
c	- 56,6	+ 23 L	0,85	0	94,2	0,9	4,9	0	.72	.96	65	20
QR12 a	- 59,5	- 25 G	0,25	0,56	80,5	1,3	8,0	10,2	.12	.34	310	71

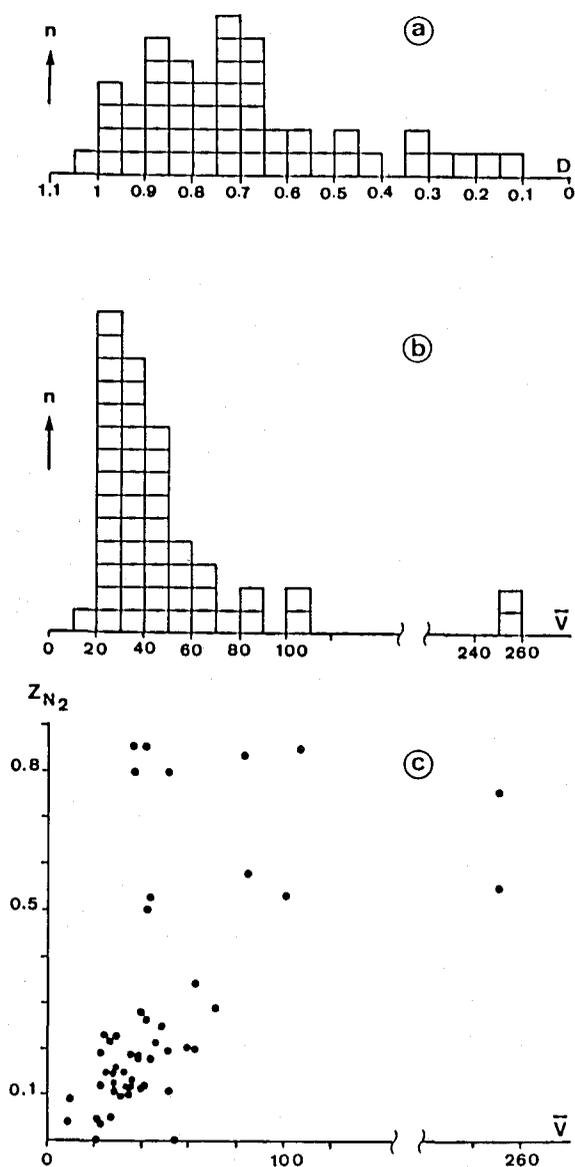


Fig. 5.- Densités (a), volumes molaires en cm^3/mole (b) et corrélations $Z_{N_2} - \bar{V}$ (c).

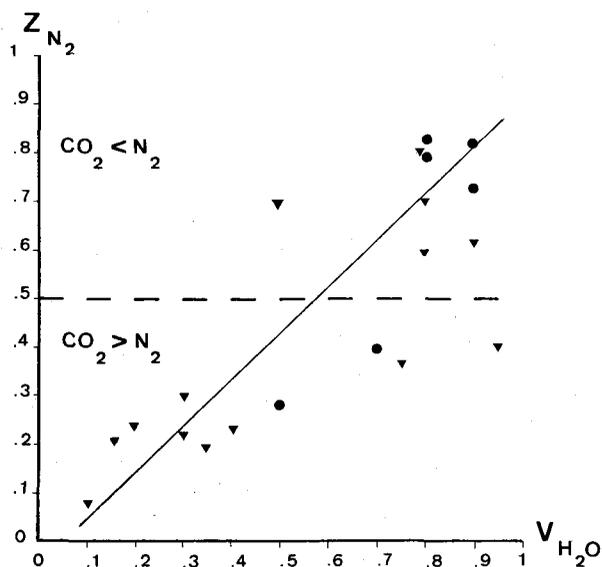


Fig. 6.- Corrélation $Z_{N_2} - v_{H_2O}$.

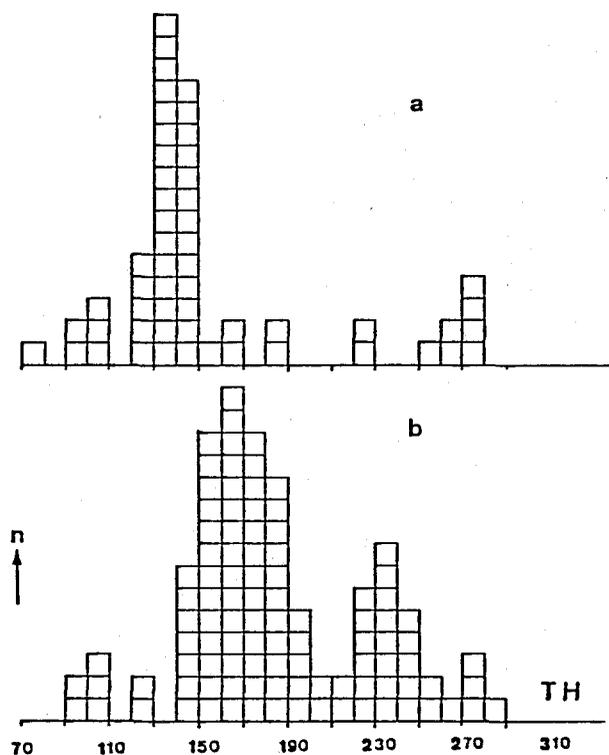


Fig. 7.- Températures d'homogénéisation TH des inclusions aqueuses du type B. Les quartz en relation avec les roches granitiques (a); les quartz du massif de Rocroi (b).

Lors de la chauffe, la décrépitation peut affecter l'inclusion, à des températures proches de 240° , 260° , et 310°C .

Les inclusions des types A_1 et B_1 définissent une population unique qui représente le piégeage d'un fluide hétérogène dont les pôles extrêmes sont CO_2 ($-N_2$) et $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$.

La présence d'inclusions des deux types, CO_2 riches et H_2O riches est un critère d'évidence de l'existence de ces deux fluides comme phases immiscibles au moment du piégeage (Roedder, 1981). D'autres processus peuvent amener le même résultat, comme la division par étranglement ou le piégeage de deux fluides sans relation à des époques différentes. Mais aucun signe n'apparaît pour illustrer ces deux derniers processus dans les quartz étudiés.

On rencontre le fluide A_1 - B_1 dans les quartz filoniens des zones métamorphiques de Bastogne et du Massif de Stavelot (QR8 et QR12; QS17 à QS21, QS23 et QS24).

Les températures d'homogénéisation des inclusions du type B_2 sont comprises entre 140° et 260°C , avec une plus grande fréquence entre 150° et 180°C vers les basses températures; et entre 220° et 250°C vers les hautes températures (fig. 7b).

Le premier domaine se rencontre dans les quartz QR1, QR2, QR4, QR5, QS20, QS21 et

Tableau 6.- Compositions des inclusions azotiques (type C), à partir des données microthermométriques:

Ech.	Microthermométrie		Composition		
	TH _{N2} (°C)	Tf _{CO2} (°C)	Z _{N2}	Z _{CO2}	Z _{CH4}
QR12 b	- 146	L - 83,6	0,96	0,03	0,01
c	- 150	L - 80,5	0,93	0,06	0,01
d	- 145	G	0,99	0	0,01
e	- 144	G	0,96	0,02	0,02
f	- 145,5		0,99	0	0,01
g	- 145,4	L	0,99	0	0,01

QS24. Le second domaine a été mesuré dans les quartz QS17, QS18, QS19, QS21, QN14, QN15, QR4 et QR5.

La présence d'un cube de sel est parfois suggérée par le contour de la cavité comme dans QR1 et QS21. Certaines inclusions contiennent un cube de NaCl dans le liquide comme dans l'échantillon QR2.

Les températures d'homogénéisation du type B₃ sont inférieures à 140°C (fig. 7a). Elles sont caractéristiques des quartz en relation avec des roches éruptives comme les quartz du microgranite du Mairupt (QR3) ou de la tonalite de la Helle (QS27). Les TH les plus fréquentes sont comprises entre 120° et 140°C. Des cubes de sel ont été observés dans le quartz QR3.

On trouve les inclusions du type B₃ également dans les quartz filoniens comme à Revin (QR2) ou Neidingen (QS25); ces inclusions se repèrent facilement grâce à leur très faible remplissage gazeux et à la constance de leur rapport volumique gaz/liquide.

Les inclusions du **type C**, de composition appartenant au système N₂-CO₂-CH₄ ont été décelées à la microsonde à effet Raman. Elles adoptent une forme de cristal négatif; leur contenu est de teinte foncée, soulignée par un liséré noir périphérique. Elles sont groupées et alignées le long des plans de fractures.

La densité des inclusions azotiques est proche de la densité critique de l'azote (0.31) comme le montrent les températures d'homogénéisation de l'azote liquide et de l'azote gazeux en une seule phase liquide ou gazeuse, comprises entre -150° et -144°C (tabl. 6); ces inclusions contiennent peu de CO₂ (Z_{CO2} < 0.06) et très peu de CH₄ (Z_{CH4} < 0.02).

Les inclusions azotiques sont particulièrement abondantes dans les quartz de Bastogne (QR12).

Distribution régionale des fluides

La répartition géographique des températures d'homogénéisation se superpose à celle des compositions : là où les TH sont élevées, on trouve le fluide A₁-B₁; aux températures intermédiaires correspondent les inclusions des types A₂ et B₂; vers les TH faibles, on ne trouve plus que des inclusions aqueuses des types B₂ et B₃.

On peut distinguer quatre zones le long de l'axe anticlinal de l'Ardenne, du Massif de Rocroi à l'Ouest, jusqu'à la bordure Sud du Massif de Stavelot (fig. 8 et 9) :

- une zone à H₂O : les inclusions des types B₂ et B₃ sont caractéristiques des échantillons de Fumay QR1, Revin QR2, Mairupt QR3, Nohan QR4, Charmaie QR5, Serpont QR8 et Remagne QR9.

- une zone à H₂O-N₂ avec les inclusions du type A₂ représentée par les quartz filoniens de la zone non métamorphique, comme Poix-St-Hubert QN13, Ortho QN14 et de Nisramont QN15.

- une zone à CO₂-N₂ qui comprend les deux zones métamorphiques de la bordure du Massif de Stavelot et de la région de Bastogne.

- une zone à N₂, confondue avec la sous-zone de Bastogne.

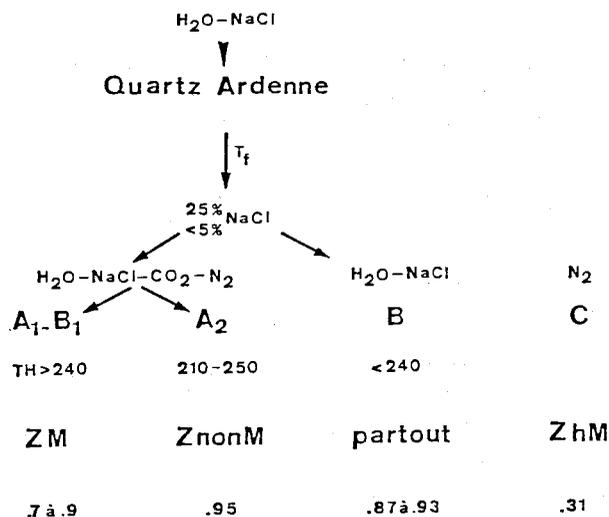


Fig. 8. Types de fluides rencontrés.

INTERPRETATION

EVOLUTION DES FLUIDES DANS LE DIAGRAMME P-T

La construction de isochores dans le plan P-T s'effectue à l'aide du programme d'Holloway (Hollister *et al.*, 1981), modifié et mis en oeuvre à

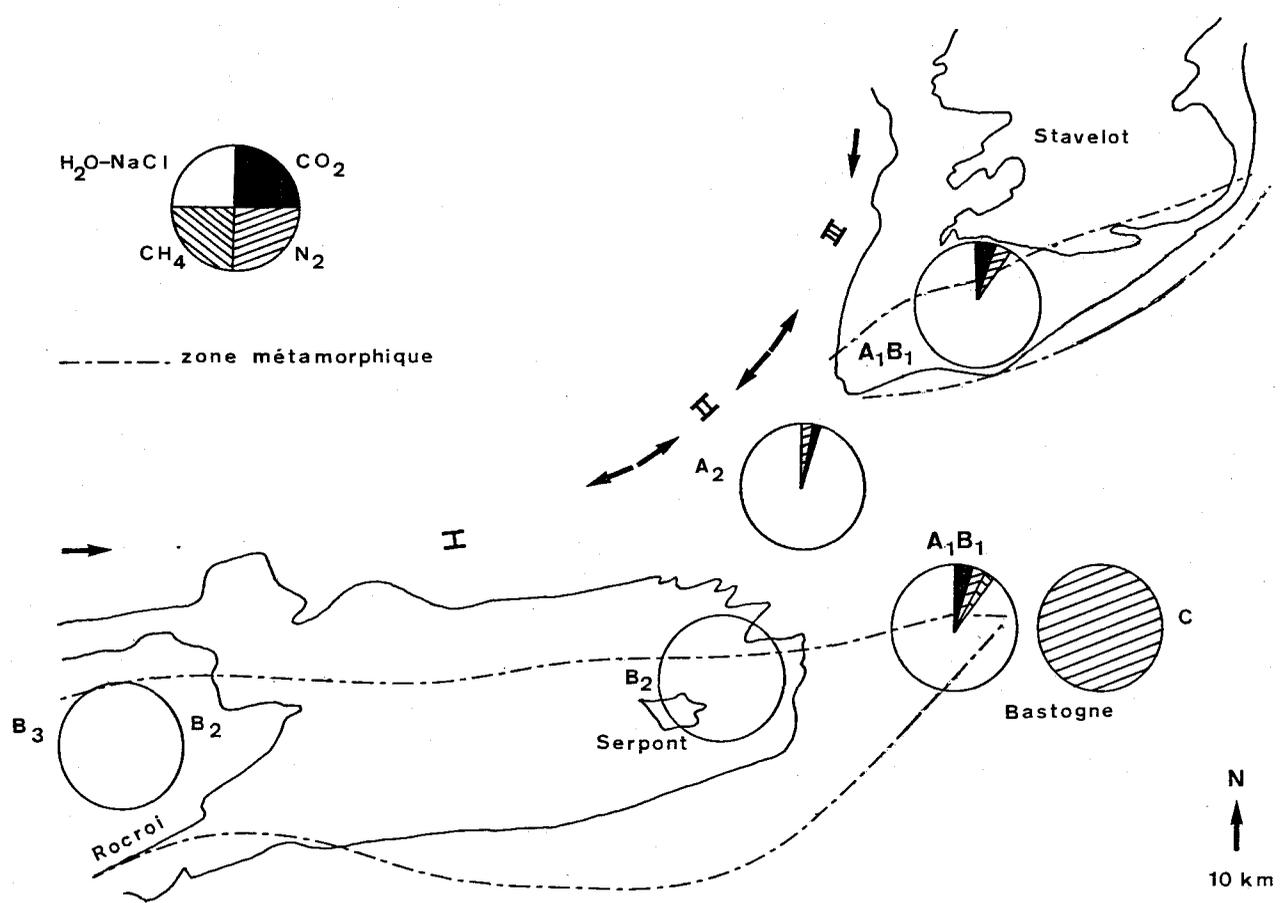


Fig. 9.- Répartition géographique des fluides.

l'Institut des Sciences de la Terre à l'Université Libre d'Amsterdam, à partir du volume molaire global V et de la composition de l'inclusion.

Pour le fluide hétérogène A_1-B_1 , on peut considérer les deux termes extrêmes : le fluide à 100 % CO_2 a un volume molaire de $55 \text{ cm}^3/\text{mole}$ ou une densité de 0.8; le fluide aqueux est caractérisé par sa TH la plus basse (240°C).

La rencontre des isochores (fig. 10) des fluides de compositions extrêmes se fait dans un domaine de température-pression voisin de 400°C et 1.8 Kbar; ce qui correspond à un gradient géothermique de $50^\circ\text{C}/\text{km}$.

Les température et pression de piégeage ainsi définies tombent dans le domaine des T-P déduites des assemblages minéralogiques, caractéristiques du métamorphisme. La pression est approchée de façon plus précise.

L'isochore du fluide A_2 , essentiellement aqueux mais dont la phase gazeuse contient plus de N_2 que de CO_2 est définie par un volume molaire global de $19.62 \text{ cm}^3/\text{mole}$, ou une densité de 0.945 pour une composition correspondant à

96 % H_2O - 2.8 % N_2 - 1.2 % CO_2 . Sa position suggère des conditions de température faible pour des pressions modérées.

Les isochores des fluides B_2 et B_3 sont tracées à partir des TH de 240° , 215° , 150° et 130°C (fig. 10). Les recherches de A. Beugnies (comm. pers.) dans la région du massif de Rocroi tentent à montrer que le gradient géothermique est pratiquement normal et bien différent de celui de la région de Bastogne. Ceci m'invite à prolonger les isochores vers le domaine des pressions plus élevées de façon à rencontrer les courbes de gradient géothermique de $30^\circ/\text{km}$.

Le fluide azotique du type C est caractérisé par une isochore très plate qui implique des faibles pressions de formation probablement inférieures à 1 Kbar.

EVOLUTION DES FLUIDES DANS L'ESPACE

La répartition géographique des fluides (fig. 9) appelle plusieurs commentaires :

- dans le secteur oriental de l'aire anticlinale de l'Ardenne, les **zones métamorphiques** de Stavelot et de Bastogne contiennent des filons de

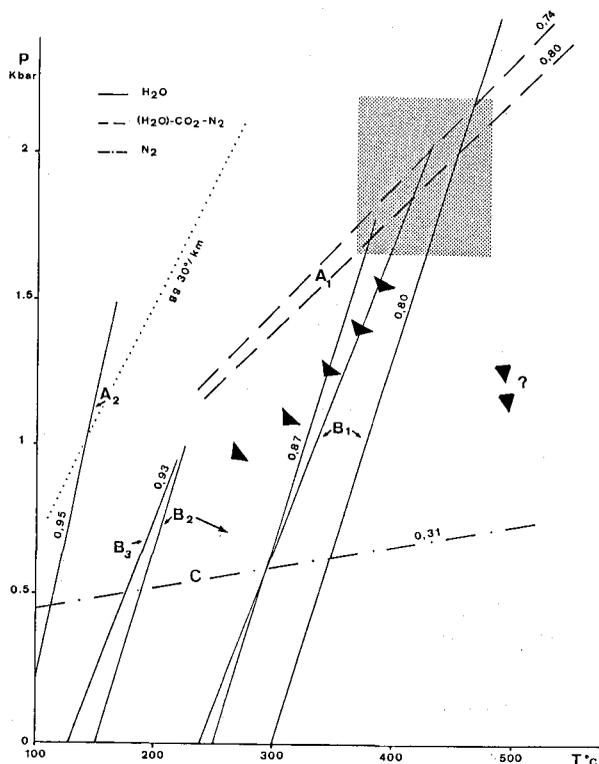


Fig. 10.- Représentation des isochores des fluides dans le plan pression-température.

quartz caractérisés par la présence du fluide hétérogène de composition $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{CO}_2-\text{N}_2$. CO_2 et N_2 sont contenus dans ces inclusions en proportions variables. Comme ces deux gaz sont miscibles en toute proportion, on peut supposer qu'ils ont des origines différentes et qu'ils n'ont pas eu le temps de se mélanger pour former un fluide homogène.

Le CO_2 peut provenir de la décarbonatation, de la dégradation de la matière organique, ou encore d'un magma. Quant à l'azote, il peut également provenir de la dégradation de la matière organique. En outre, la destruction des minéraux potassiques constitue une des sources potentielles de ce gaz (Garrels *et al.*, 1974).

La relative pauvreté de l'encaissant en carbonates ne plaide pas en faveur de l'hypothèse de la décarbonatation. L'hypothèse de la dégradation de la matière organique libérant azote et carbone peut être rejetée pour plusieurs raisons : C et N doivent coexister en proportion constante (Stevenson, 1962); les rapports azote/carbone sont trop élevés (Müller, 1977); et le méthane est absent.

Dès lors on peut retenir les hypothèses suivantes pour l'origine de ces gaz : une source profonde, voire magmatique pour le CO_2 ; et une source locale pour N_2 à partir de la libération des ions NH_4^+ fixés dans les sédiments péliques environnants (Iitihara *et al.*, 1979).

Les conditions P-T de dépôt des quartz filoniens en zones métamorphiques démontrent la relation étroite qui existe entre ces filons et le métamorphisme.

- à l'intérieur de la zone métamorphique Ouest, dans la région de Bastogne, on rencontre les inclusions azotiques du type C, de densité voisine de 0.3.

La corrélation entre la teneur en azote et le degré métamorphique a été mise en évidence au Mont Agout (Kreulen, 1982).

Cette population d'inclusions n'est sans doute pas étrangère à la nature de la biotite qui présente un déficit en K^+ et que l'on appelle « bastonite ». Il pourrait s'agir d'une biotite amoniacale.

- dans la zone **non métamorphique** qui s'étend entre les zones métamorphiques de Stavelot et de Bastogne, les quartz filoniens contiennent des inclusions de composition $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}-\text{N}_2-\text{CO}_2$ (type A_2) d'un genre très différent de celui du fluide hétérogène A_1-B_1 , puisque :

- 1) la phase aqueuse prédomine ($L/G > 0.8$)
- 2) la phase gazeuse est plus riche en N_2 qu'en CO_2 ($Z_{\text{N}_2} > 0,7$)
- 3) les rapports C/N sont constants ($1/4 < C/N < 1/3$)
- 4) le méthane est présent en très faible quantité ($Z_{\text{CH}_4} < 0.07$).

La constance du rapport C/N, la présence de CH_4 et l'abondance de l'eau dans ces inclusions sont autant d'arguments qui militent en faveur d'une origine des volatils à partir de la matière organique. La valeur du rapport C/N inférieure à 1, semble toutefois s'y opposer, à moins qu'une partie du Carbone ait été fixée.

L'homogénéité du fluide rencontré dans la zone non métamorphique contraste avec l'hétérogénéité du fluide caractéristique des zones métamorphiques. Cette homogénéité s'explique soit par une source unique de tous les composants, soit par un brassage de fluides d'origines différentes pendant une longue période.

Peut-il exister une parenté entre les fluides des zones métamorphiques et ceux des zones non métamorphiques; ou encore peuvent-ils trouver leur origine dans un même processus ?

On peut imaginer que la migration du CO_2 et du N_2 dans une solution aqueuse s'est faite à partir des zones métamorphiques vers les zones non métamorphiques. L'éloignement croissant par rapport au foyer générateur de CO_2 implique une diminution de la teneur en CO_2 par rapport à la teneur en N_2 , qui peut provenir des roches encaissantes (fig. 11).

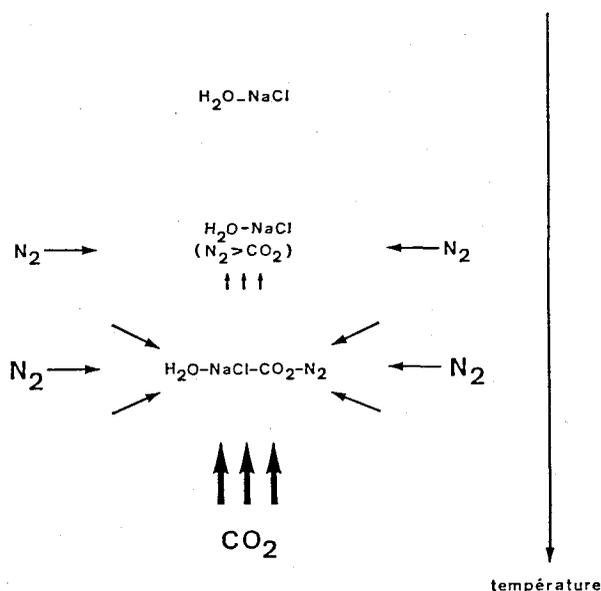


Fig. 11.- Evolution des fluides piégés dans l'espace.

- dans le secteur occidental, dans le Massif de Rocroi et sa bordure Est, les filons de quartz qu'ils soient tardifs ou hercyniens, montrent seulement des inclusions aqueuses. CO_2 et N_2 n'ont été détectés que dans la quartzite de Sainte-Marie-Chevigny, qui est une roche métamorphique.

Les températures d'homogénéisation augmentent d'Ouest en Est.

CONCLUSIONS

Si l'étude des inclusions fluides dans les quartz d'Ardenne a permis de fixer les conditions de piégeage, en relation avec le métamorphisme, elle fait rejaillir l'éternelle querelle entre magmatistes et ségrégationnistes.

En effet, la découverte des composants volatils CO_2 et N_2 jointe à la discussion sur leur origine montre que le choix n'est pas simple. Seule une étude isotopique du Carbone au sein même de l'inclusion apportera peut-être une interprétation définitive.

Il n'en reste pas moins intéressant de tirer parti de tous les enseignements apportés par l'étude des inclusions fluides. Leur composition, par exemple peut renseigner sur la relation qui existe entre le filon de quartz et le métamorphisme; elle aura valeur de carte d'identité dans les travaux futurs. De plus, dans certains cas, cas du fluide hétérogène, les conditions P-T de formation du minéral seront définies avec plus de précision que par la méthode des stabilités minéralogiques.

REMERCIEMENTS

La présente étude a pu être menée grâce à une bourse de spécialisation octroyée par l'I.R.S.I.A., au laboratoire de Géologie Appliquée de l'Université de Liège, sous la direction du professeur F. Dimanche. Les données à la microsonde à effet Raman ont été récoltées à Amsterdam et à Lille, par Messieurs E.A.J. Burke et P. Dhamelincourt.

Je remercie Monsieur J. Touret pour ses critiques positives et son accueil bénéfique en son laboratoire.

BIBLIOGRAPHIE

- ANTUN, P., 1971.- Le prolongement de la zone métamorphique de Bastogne au Grand Duché de Luxembourg. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 94 : 153-163.
- BERGER, 1964.- Etude du gisement sédimentaire de Manganèse de la Liéne. *Mém. fin d'études*, ULg.
- BEUGNIES, ., 1964.- Essai de synthèse du Géodynamisme paléozoïque de l'Ardenne. *Revue de Géogr. Phys. et de Géol. Dyn.*, VI(4) : 269-277.
- BEUGNIES, A., 1973.- Ardenne. In : Guides géologiques régionaux Ardenne-Luxembourg. Masson et cie, éd., 206 p.
- BEUGNIES, A., CHAVEPEYER, G. & MERCIER, M., 1980.- Sur le métamorphisme de la partie méridionale du Massif cambrien de Rocroi. Les zones à chloritoïde et à ilménite. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, C : 131-138.
- BEUGNIES, A. & CHAVEPEYER, G., 1981.- Sur le métamorphisme de la partie méridionale du massif cambrien de Rocroi. La zone à magnétite. *Mém. Inst. Géol. Univ. Louvain*, 31 : 135-149.
- BEUGNIES, A., 1982.- Structure de l'aire anticlinale de l'Ardenne à l'Ouest du méridien de Libramont. *Ann. Soc. Géol. du Nord*, C II : 165-173.
- BRUMAGNE, D., 1963.- Note préliminaire sur l'étude géologique du site de Nisramont en vue de la construction d'un barrage sur l'Ourthe. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 86 (3) : B147.
- COLLINS, P.L.F., 1979.- Gas hydrates in CO_2 -bearing Fluid Inclusions and the use of freezing data for estimation of salinity. *Econ. Geol.*, 74 : 1435-1444.
- CORIN, F., 1929.- Un nouveau filon d'andalousite à Regné. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 63 : 16-18.
- CORIN, F., 1931.- Sur la présence de xénotime et d'autres minéraux contenant des terres rares, dans les veines à bastonite de Bastogne. *Bull. Soc. belge Géol.*, XLI : 109-111.
- CORIN, F., 1932.- Session extraordinaire de la Société Belge de Géologie, de Paléontologie et d'Hydrologie et de la Société géologique de Belgique tenue à Libramont en 1931. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 54 : 413-455.
- DARIMONT, A. & DHAMELINCOURT, P., 1985.- Détection de CO_2 , N_2 et CH_4 dans les inclusions fluides de quartz d'Ardenne par microthermométrie et microsonde à effet Raman. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 108 : 361-364.
- DARIMONT, A. & HEYEN, G., 1985.- Simulation des équilibres de phases dans le système CO_2 - N_2 . Application aux inclusions fluides. *Chem. Geol.*, sous presse.
- de BETHUNE, S., 1977.- Le métamorphisme de Libramont. *Doctorat en Sciences*, Univ. Cath. Louvain.
- DEICHA, G., 1976.- Les cavités intracrystallines microscopiques des matériaux de la lithosphère. *Bull. Soc. fr. Min. et Cristal.*, 99 : 69-73.
- DELHAYE, M. & DHAMELINCOURT, P., 1975.- Raman Microprobe and Microscope with laser excitation. *Journ. of Raman Spectroscopy*, 3 : 33 p.
- de RAUW, H., 1912.- Découverte d'un filon de quartz tourmalinifère à Petit-Thier. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 39 : 179-180.

- FONTIGNIE, D., 1973.- Méthodes physiques de détermination des chlorites. *Mém. fin d'études*, Ulg.
- FOURMARIER, P., BINTZ, J. & LAMBRECHT, L., 1968.- Anomalies de la schistosité dans le Paléozoïque de la Haute-Ardenne. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 91 (2) : 171-269.
- FRANSOLET, A.-M., KRAMM, U. & SCHREYER, W., 1977.- Metamorphose und Magmatismus im Venn-Stavelot Massiv, Ardennen. *Fortschr. Min.*, 55, Beiheft 2 : 75-103.
- FRANSOLET, A.-M., 1978.- Données nouvelles sur l'ottrélite d'Ottré, Belgique. *Bull. Minéral.*, 101 : 548-557.
- FRANSOLET, A.-M. & KRAMM, U., 1983.- Mineralogie und Petrologie Mn-reicher metapelite des Venn-Stavelot Massivs, Ardennen, und die varistische Metamorphose im Nordwestlichen Rheinischen Schild. *Fortschr. Min.*, 61, Beiheft 2 : 31-69.
- FRANSOLET, A.-M. & SCHREYER, W., 1984.- Sudoïte, di/trioctahedral chlorite : a stable low-temperature phase in the system MgO-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *Contr. Mineral. Petrol.*, 86 : 409-417.
- GARRELS, R.M., MacKENZIE, F.T. & HUNT, C., 1974.- Man's contributions to natural chemical cycles. Syllabus.
- HOLLISTER, L.S. & BURRUS, R.C., 1976.- Phase equilibria in fluid inclusions from Khatada Lake metamorphic complex. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 40 : 163-175.
- ITIHARA, Y. & HONN
metamorphic and granitic rocks of Japan. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 43 : 503-509.
- KRAMM, U., 1973.- Chloritoid stability in manganese rich low-grade metamorphic rocks, Venn-Stavelot Massif, Ardennes. *Contr. Mineral. Petrol.*, 41 : 179-196.
- KREULEN, R. & SCHUILLING, R.D., 1982.- N₂-CH₄-CO₂ fluids during formation of the Dôme de l'Agout, France. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 46 : 193-203.
- LAMBERT, A. & BELLIERE, J., 1976.- Caractères structuraux de l'éodévotionien aux environs de Bastogne. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 99 (II) : 283-297.
- LEPERSONNE, J., 1932.- Découvertes de filons d'albite dans le Dévotionien du Canton de Saint-Vith. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 55 : 144-146.
- LEPERSONNE, J., 1933.- La répartition des filons d'origine profonde du Canton de Saint-Vith (note préliminaire). *Ann. Soc. géol. Belg.*, 56 : 278-280.
- LEPERSONNE, J., 1934.- Contribution à l'étude des filons d'Ardenne. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 78 : 3-49.
- MICHOT, J., 1955.- Genèse du chloritoïde en milieu statique. *Ann. Soc. géol. Belg.*, 78 : 3-49.
- MULLER, P., 1977.- C/N ratios in Pacific deep-sea sediments : effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 41 : 765-776.
- POTY, E., LEROY, J. & JACHIMOWICZ, L., 1976.- Un nouvel appareil pour la mesure des températures sous le microscope : l'installation thermométrique Chaixmeca. *Bull. Soc. fr. Min. et Cristal.*, 99 : 182-186.
- ROEDDER, Ed., 1984.- Fluid inclusions. *Review in Mineralogy*, 12, *Min. Soc. of America*, éd. Ribbe P.H., 644 p.
- ROSASCO, G.J., ETZS, E.S. & CASSAT, W.A., 1975.- The analysis of discrete fine particles by Raman Spectroscopy. *Appl. Spectrosc.*, 29 : 396-404.
- SCHREYER, W., 1975.- New petrologic evidence for hercynian metamorphism in the Venn-Stavelot Massif, Belgium. *Geol. Rdsch.*, 64 : 819-830.
- SCHROETTER, H.W. & KLOECKNER, H.W., 1979.- Raman scattering cross sections in gases and liquids. In : *Raman Spectroscopy of gases and liquids*, éd. Weber A., Springer-Verlag : 123-166.
- STEVENSON, F.J., 1962.- Chemical state of the nitrogen in rocks. *Geoch. et Cosmoch. Acta*, 26 : 797-809.