

MINERALOGIE DES FRACTIONS FINES ET DATATIONS RUBIDIUM-STRONTIUM DANS LE GROUPE BAMBUÍ, MG, BRÉSIL

MICHEL G. BONHOMME*

ABSTRACT A study of the illite crystallinity of sediments of the Upper Precambrian Bambuí Group, MG, has been done to determine the zones without metamorphism, the only ones able to give the age of the sedimentation. Only the region of Januária escaped from any sensible thermo-tectonic event. The Bambuí sediments contain well crystallized vermiculite probably formed during the anchimetamorphism.

The rubidium-strontium age obtained in Januária (619 ± 17 m.y.) corresponds in fact to the main phase of the Brazilian orogenic cycle. The late isotopic homogenization was caused by a strong late diagenesis. The anchimetamorphic phosphateous sediments in Cedro do Abaete show that the ferro-magnesian illite is a more easily open system than aluminous illite, and in this case dates the later event of the Brazilian cycle at 445 ± 25 m.y. The age of 600 m.y. for the metamorphism is a younger limit for the real age of the Bambuí, the late Precambrian age of which is confirmed.

RESUMO O estudo da cristalinidade das ilitas nos sedimentos do Grupo Bambuí (Pré-cambriano), em Minas Gerais, foi efetuado com a finalidade de caracterizar zonas sem metamorfismo, as únicas capazes de fornecer a época da sedimentação. Apenas a região de Januária revelou-se isenta de qualquer evento termotectônico sensível. Além disso, verificou-se a presença de vermiculita bem-cristalizada nos sedimentos, formada durante o anchimetamorfismo.

A idade rubídio-estrôncio obtida em Januária (619 ± 17 m.a.) corresponde à fase principal do ciclo orogênico Brasileiro. A homogeneização isotópica do estrôncio foi causada por uma intensa diagênese tardia. Os sedimentos fosfáticos anchimetamórficos de Cedro do Abaeté mostraram que as ilitas ferromagnesianas representam sistemas mais abertos do que as ilitas aluminosas e, nesse caso, permitem datar os eventos posteriores do ciclo Brasileiro, com 445 ± 25 m.a. A idade de cerca 600 m.a. para o metamorfismo é um limite mínimo para a idade real do Grupo Bambuí, confirmando sua atribuição ao Pré-cambriano superior.

INTRODUCTION Le craton de São Francisco défini par Almeida (1967) et par Almeida *et al.* (1973) s'étend entre les zones plissées et métamorphiques de Brasília à l'Ouest, de Ribeira au Sud et du Sergipe au Nord-Est. Il porte une couverture sédimentaire parfois légèrement métamorphique dont la stratigraphie a été précisée récemment par Marchese (1974a) dans l'état de Minas Gerais et par Mascarenhas (1973a) dans l'état de Bahia. Les deux régions sédimentaires sont séparées par la zone plissée et métamorphique de la Serra do Espinhaço et son prolongement Nord, parallèle au cours moyen du Rio São Francisco. La corrélation entre les deux bassins n'est pas définitivement établie. La seule formation considérée comme identique est la formation Sete Lagoas constituée de calcaire lité noir à lits millimétriques argileux. L'identité de l'âge de cette formation dans le Minas Gerais et dans le Bahia n'est pas confirmée: il se peut que la sédimentation ait eu lieu à des dates très différentes. En effet, entre les bords Ouest et Est du bassin situé dans le Minas Gerais, Cloud et Dardenne (1973) et Marchese (1974b) lui attribuent respectivement un âge compris entre 950 et 1350 m.a. ou compris entre 650 et 1000 m.a. grâce à l'étude des stromatolites. Cependant les auteurs sont unanimes pour attribuer aux séries sédimentaires

*Centre de Sédimentologie et Géochimie de la Surface, Institut de Géologie de l'Université Louis Pasteur, 1, rue Blessig, F. 67 084 Strasbourg - Cedex

reposant sur le craton du São Francisco un âge précambrien supérieur. La présence de une ou plusieurs séquences tillitiques (Isotta *et al.*, 1969), jointe à la position des stromatolites, pose le problème de la position exacte de ces séries. Une première tentative de datation isotopique a été publiée en 1967 par Amaral et Kawashita. L'âge obtenu: 600 m.a., est un âge minimum, car l'ordonnée à l'origine: 0,83 montre une importante mobilisation isotopique postérieure à la sédimentation. Le problème a donc été repris en tentant de trouver les zones favorables à une datation stratigraphique numérique au moyen des argiles (Clauer, 1976).

METHODE D'ETUDE Le problème général de la datation des roches sédimentaires a déjà été exposé par Bonhomme et Clauer (1972) et Clauer (1975).

La méthode que ces auteurs ont préconisée a été appliquée aux sédiments de la formation Bambuí. Elle comporte plusieurs étapes successives:

prélèvements sur le terrain ou parmi des carottes de sondage de groupes d'échantillons: 5 à 20 par localisation (le poids de chaque échantillon est de l'ordre de 500 à 1 000 g; la qualité des prélèvements doit être particulièrement soignée, spécialement en pays tropical, pour éviter toute trace visible d'altération météorique);

extraction et étude par diffraction des rayons X de la fraction argileuse inférieure à 2μ selon la technique décrite par Thiry (1974);

analyse de la fraction inférieure à 2μ à quatre reprises par diffraction des rayons X: une première sans traitement, une seconde après traitement à l'éthylène-glycol, une troisième après traitement à l'hydrazine et enfin une quatrième après quatre heures de chauffage à 490°C ;

choix des lieux et des échantillons à analyser par les méthodes isotopiques en fonctions de la nature et des caractéristiques minéralogiques des argiles;

analyse isotopique des fractions inférieures à 2μ et de quelques roches totales, en particulier les roches carbonatées.

25 analyses isotopiques rubidium-strontium ont été effectuées, par dilution isotopique, dont 4 sur des roches totales carbonatées ou pélitiques, selon la méthode décrite par Prévôt (1968) et Clauer (1976).

Les constantes utilisées sont les suivantes: $85 \text{ Rb}/87 \text{ Rb} = 2,591$; $86 \text{ Sr}/88 \text{ Sr} = 0,1194$; $\lambda_{87 \text{ Rb}} = 1,39 \cdot 10^{-11} \text{ an}^{-1}$. Pour les 2 analyses potassium-argon, les données de Smith (1964) ont servi dans le calcul.

ANALYSE MINÉRALOGIQUE DES FRACTIONS INFÉRIEURES À DEUX MICRONS Les localisations des coupes étudiées sont reportées sur la Figure 1. L'échantillonnage porte sur la partie Sud-Est du bassin du Bambuí dans le Minas Gerais, région comprise entre Três Marias—Curvelo—Belo Horizonte (formations Sete Lagoas, Santa Helena et Lagoa do Jacaré). Un profil Est-Ouest a été étudié entre João Pinheiro et Januária (formations Três Marias et Sete Lagoas). Enfin, trois sondages du gisement de phosphates d'Abaeté ont permis une analyse plus détaillée.

127 échantillons, dont 50 d'Abaeté, ont été analysés. 4 prises étudiées en roche totale par Amaral et Kawashita (1967) à Vazante font partie de cet ensemble.

1. *Composition minéralogique de la fraction inférieure à 2μ* a) Nature des fractions fines (Tableau I) Toutes les fractions fines étudiées contiennent de l'illite: 40 à 100%. A Fazenda Vermelho, dans les échantillons prélevés dans le calcaire de la formation Bambuí s.s., la proportion est réduite à moins de 10%.

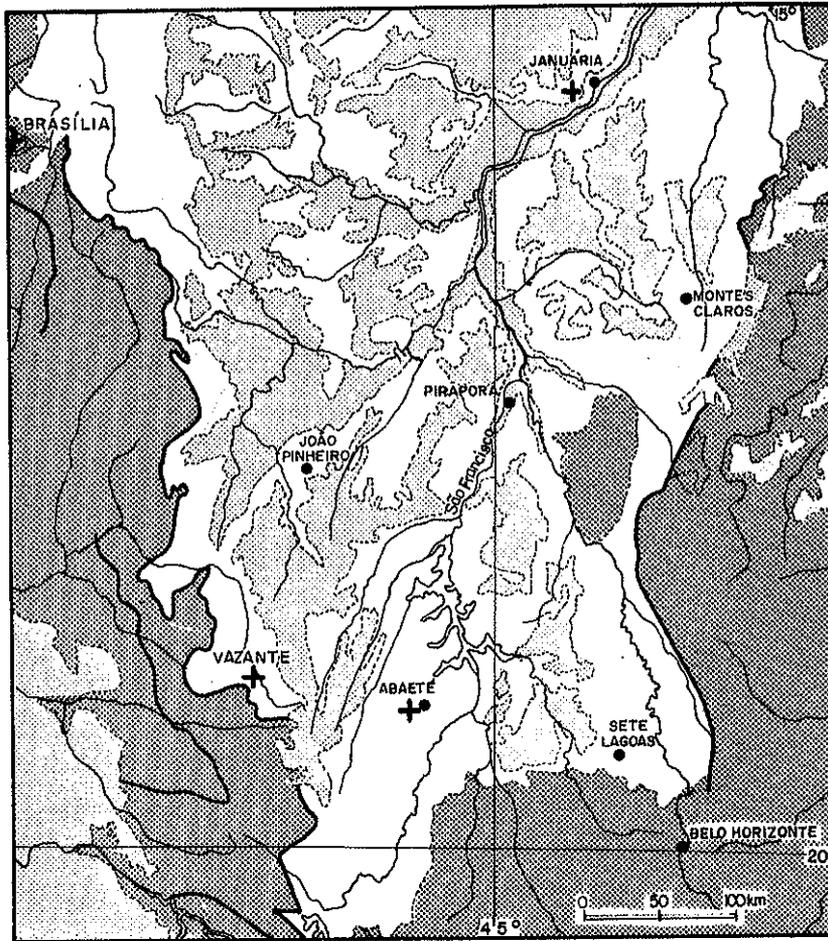


Figure 1 — Localisations des coupes étudiées. Legende: gris-foncé, Précambrien; blanc, Eocambrien; gris-clair, Phanérozoïque; +, lieux d'échantillonnage

La kaolinite n'est présente que dans trois échantillons seulement. D'autre part deux échantillons de faible profondeur de l'un des sondages de la série phosphatée d'Abaeté contiennent de l'halloysite. Ces minéraux sont le signe d'une altération météorique importante. Ils ont donc été écartés de tous les calculs et de toutes les autres analyses. La smectite n'est visible que dans l'un des trois horizons de la série phosphatée d'Abaeté et dans les échantillons de Apertado. La chlorite accompagne l'illite dans la partie sud du bassin du Bambuí et en particulier dans l'un des horizons de la série phosphatée. La vermiculite est présente à João Pinheiro et à Pirapora dans la partie centrale du bassin. Des minéraux interstratifiés s'observent un peu partout. Ils sont de natures différentes. Lucas (1962) distingue ces minéraux par le comportement apparent de certains feuillets vis-à-vis des agents d'analyses des argiles aux rayons X, tels que l'éthylène-glycol ou le chauffage. Ce comportement peut ressembler à celui de l'illite: feuillet à 10 Å; de la smectite à 14 Å: 14_{sm} ; de la chlorite: 14_c ; ou de la vermiculite: 14_v . Les interstratifiés de type ($14_c - 14_{sm}$) ou ($14_c - 14_v$) sont fréquents dans le groupe Bambuí. La présence de vermiculite en quantité importante dans deux localités corrobore la présence d'interstratifiés ($14_c - 14_v$).

L'illite et la chlorite s'observent ensemble dans toute la partie sud du bassin, depuis

Tableau I -- Données minéralogiques des fractions fines dans le Groupe de Bambuí (MG)

Localité	Nombre d'échant.	Illite	Smeectite	Chlorite	Vermiculite	Interstratifiés	Indice de cristallinité ⁽¹⁾	$\frac{I_{002}}{I_{001}}$
Sete Lagoas	20	50 à 80%	traces	0 à 50%		0 à 25% $14_c - 14_{sm}$ traces $14_c - 14_v$	$3,1 \pm 0,3$	0,23 à 0,56
Cedro do	sup.	22	100%			traces $14_c - 14_{sm}$	$4,2 \pm 0,3$	0,15 à 0,20
	moy.	14	55 à 85%	0 à 20%	15 à 45%	traces $14_c - 14_{sm}$	$4,0 \pm 0,3$	0,28 à 0,40
Abaeté	inf.	10	15 à 65%	35 à 85%			$4,1 \pm 0,6$	0,28 à 0,56
João Pinheiro	15	35 à 70%			30 à 65%	2 échantillons 30% $14_c - 14_v$	$5,4 \pm 0,4$	0,31 à 0,47
Apertado	7	40 à 55%	25 à 35%			15 à 45% $14_c - 14_v$	$5,1 \pm 0,4$	0,45 à 0,54
Januária	6	75 à 100%		0 à 25%		traces $14_c - 14_v$	$6,7 \pm 0,6$	0,58 à 0,65
Vazante(2)	4	80 à 100%	0 à 15%	0 à 20%			$4,1 \pm 0,4$	0,14 à 0,34

(1) Limites utilisés (Dunoyer de Segonzac, 1969)

diagénèse

----- 5,75

anchimétamorphisme

----- 3,5

épimétamorphisme

(2) Amaral et Kawashita, 1967

Vazante jusqu'à l'Est de Sete Lagoas. La vermiculite se situe dans la partie centrale du bassin, de João Pinheiro à Apertado, et semble limitée à la formation Três Marias.

b) Caractéristiques minéralogiques de l'illite Deux paramètres permettent de caractériser l'illite: l'indice de cristallinité, défini par Kubler (1966) et le rapport I_{002}/I_{001} utilisé par Esquevin (1969).

L'indice de cristallinité de l'illite I_k , correspond à la largeur en mm du pic à 10 Å du diffractogramme de l'illite à la moitié de la hauteur. Pour la série de Bambuí, l'indice de cristallinité de l'illite, présenté sur le tableau 1, situe les sédiments dans l'épizone pour la partie sud-orientale du bassin, région de Sete Lagoas. Les horizons étudiés dans la partie centrale et sud-occidentale du bassin sont anchimétamorphiques. Seuls, dans cette région, les indices des illites de l'affleurement de Januária sont typiques de séries diagénétiques.

Le rapport I_{002}/I_{001} a été utilisé par Esquevin (1969) pour caractériser la composition chimique des illites: les rapports I_{002}/I_{001} faibles ($< 0,25$) correspondent aux illites magnésiennes, proches des biotites si elles sont métamorphiques; les rapports plus élevés ($> 0,40$) correspondent aux illites alumineuses, et aux muscovites. Pour le cas de la série de Bambuí, l'indice I_{002}/I_{001} des illites est très variable. Il varie de 0,15 environ pour celles de l'un des horizons de la série phosphatée d'Abaeté, à 0,60 environ pour celles des fractions fines extraites des calcaires de Januária.

2. Discussion La répartition des indices de cristallinité des illites montre un passage progressif, pour le groupe Bambuí, d'un stade encore sédimentaire dans le centre, à Januária, à un stade anchimétamorphique, puis épimétamorphique à mesure que l'on s'approche des bordures. La tectonisation et les chevauchements observés à l'Ouest système de plissements de Brasília (Ferreira, 1972), ainsi que la schistosité visible le long de la Serra do Espinhaço au Nord de Belo Horizonte, s'accompagnent d'une transformation des

illites. Ceci montre que la série du Bambuí n'est plus sédimentaire, au sens strict du mot. Elle en garde souvent les traits extérieurs, mais elle a subi, en fait, un échauffement sensible.

a) Étude de la série phosphatée d'Abaeté (Tableau I) Toutes les fractions fines analysées sont anchimétamorphiques. Cependant la nature et la chimie des argiles permettent de distinguer trois horizons:

- un horizon supérieur à illite pure ferro-magnésienne,
- un horizon moyen à illite alumineuse (85 à 55 %) et à chlorite (15 à 45 %),
- un horizon inférieur à illite alumineuse (65 à 15 %) et à smectite (35 à 85 %) où se situent les phosphates.

La série est fortement réduite au sondage AFS 15, là où précisément la proportion de phosphate est importante ($P_2O_5 > 30\%$). En outre la smectite est liée à la présence de calcite. Lorsque la concentration en phosphate est importante, l'illite est de nouveau la seule argile présente et son indice I_{002}/I_{001} est d'environ 0,20, c'est-à-dire qu'il s'agit presque de biotites vu l'état métamorphique de la série. La présence de phosphate implique plus probablement une sédimentation chimique et exclut par conséquent l'éventualité d'un apport illitique détritique.

La présence de smectite dans une série anchimétamorphique a déjà été signalée par de nombreux auteurs dont Abbas (1974). Il semble que la présence de calcite retarde l'illitisation de la smectite pendant le métamorphisme, ce qui est l'évolution normale d'une série pélitique (Dunoyer de Segonzac, 1969). Selon cet auteur (communication orale) et selon Abbas (1974) l'absence de cations alcalins dans les horizons calcitiques pourrait expliquer, au moins en partie, la stabilité de la smectite dans ces conditions de métamorphisme. Bonhomme et Weber (1976) ont pu observer un phénomène analogue dans les dolomies précambriennes supérieures anchimétamorphiques de Bakouma (République Centre-Africaine).

b) Le problème de la vermiculite La vermiculite est généralement considérée comme le résultat de l'altération météorique de minéraux magnésiens tels que la biotite (Tardy, 1969; Paquet, 1970). Comme les échantillons étudiés proviennent d'affleurements, cette éventualité est envisageable. Or la qualité des cristaux de vermiculite est telle qu'il faut au contraire envisager une cristallisation dans des conditions de stabilité différentes des conditions lessivantes de l'altération météorique. Dans l'hypothèse d'une origine par dégradation, il devrait y avoir aussi tous les passages entre une paragenèse stable à illite et chlorite, étant donné le caractère anchimétamorphique ambiant, et les termes ultimes de la destruction des minéraux parentaux, présence en particulier de minéraux interstratifiés à feuillets de vermiculite, mal cristallisés, et de smectite. Rien de tel ne peut s'observer. Il faut donc rechercher une autre cause à la présence de cette vermiculite.

Cependant, si dans le cas des roches ultrabasiques, le chimisme particulier peut justifier l'apparition de cette phyllite magnésienne, la même possibilité n'est pas encore démontrée pour les roches sédimentaires affectées par un métamorphisme léger.

RESULTATS ET DISCUSSION Ont été choisies pour l'étude isotopique les localités suivantes:

Januária. L'indice de cristallinité des illites indique une diagenèse assez vigoureuse. Cependant il situe encore cet horizon calcaire à stromatolites dans la zone sédimentaire.

Abaeté. Les répercussions de la datation de phosphates précambriens nous ont incité à choisir cet exemple. D'autre part, les différences minéralogiques des argiles sont telles dans le sondage ASF 3, qu'une étude de géochimie isotopique s'imposait.

Tableau II -- Données minéralogiques et isotopiques rubidium-strontium des échantillons analysés

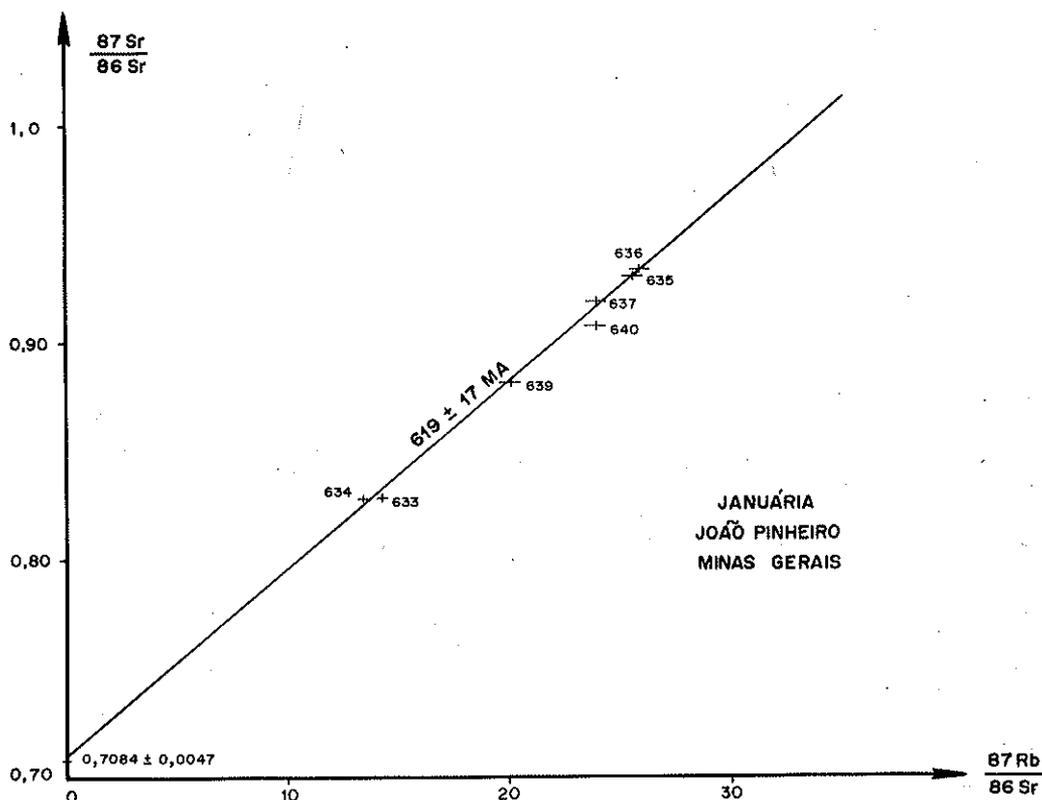
Localité	Ech.	Illite, %	Chlorite, %	Inter- stratifiés, %	I_k	$\frac{I_{002}}{I_{001}}$	Rb, ppm	Sr, ppm	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$ atomes, $\pm 2\%$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ atomes, $\pm 0,0015$
João Pinheiro		Illite, %	Vermiculite, %							
	A 633	40	60		5,0	0,42	226,6	45,9	14,309	0,8292
	A 634	40	60		5,7	0,40	238,3	51,2	13,493	0,8286
Januária		Illite, %	Chlorite, %	Inter- stratifiés, %						
	A 635	100			7,8	0,59	200,6	22,6	25,77	0,9298
	A 636	80	20	$14_c - 14_p$, traces	6,5	0,65	225,0	25,1	25,94	0,9329
	A 637	100			6,5	0,65	219,5	26,4	24,11	0,9183
	A 639	100			6,3	0,58	224,4	32,1	20,23	0,8810
	A 640	100			6,4	0,65	191,9	23,1	24,06	0,9071
	R 640	"			"	"	8,15	970	0,024	0,7084
Cedro do Abaeté		Illite, %		Inter- stratifiés, %						
	A 749	100			4,2	0,16	206,5	17,97	33,30	0,9295
	A 750	100			4,2	0,16	202,3	18,39	31,88	0,9174
	A 751	100			4,3	0,17	219,6	19,07	33,38	0,9203
	A 752 I	100			4,3	0,15	208,3	30,4	19,845	0,8453
Niveau supérieur	A 752 II	"			"	"	222,9	29,96	21,56	0,8480
Cedro do Abaeté		Illite, %	Chlorite, %	Inter- stratifiés, %						
	A 753 I	55	45	$14_c - 14_{sm}$ traces	3,3	0,37	207,9	52,2	11,535	0,8168
	A 753 II	"	"	"	"	"	189,9	51,0	10,785	0,8100
	Niveau moyen	R 753	"	"	"	"	145,8	55,6	7,601	0,7833
	A 754	65	35	$14_c - 14_{sm}$ traces	4,4	0,31	205,5	61,1	9,753	0,7959
	R 754	"	"	"	"	"	150,8	75,9	5,757	0,7639
	A 896	55	40	$14_{c_s} - 14_{sm}$	3,7	0,40	198,4	49,8	11,543	0,8067
A 897	55	40	$14_{c_s} - 14_{sm}$	4,3	0,34	186,6	38,7	13,964	0,8271	
Cedro do Abaeté		Illite, %	Smec- tite, %	Chlorite, %						
	A 755	50	20	30	3,4	0,39	181,3	36,7	14,312	0,8292
	A 756	45	55		3,6	0,37	201,5	61,7	9,476	0,7770
	Niveau inférieur	R 756	"	"	"	"	173,8	56,0	9,003	0,7772
	A 757	30	70		3,9	0,43	199,0	71,2	8,100	0,7677
	A 758	45	25	30	4,2	0,50	218,0	30,7	20,60	0,8787

Le résultat obtenu en 1967 par Amaral et Kawashita sera intégré dans la discussion. Enfin, deux échantillons riches en vermiculite provenant de João Pinheiro ont été analysés pour étudier leur comportement isotopique.

Les données analytiques sont présentées dans le Tableau II.

A. Januária (15°31'30"S et 44°25'30"W) et João Pinheiro (17°41'30" et 46°03'W) Les échantillons de Januária proviennent d'une carrière en exploitation. L'affleurement est constitué de bancs décimétriques de calcaire noir avec des interlits argileux rougeâtres probablement témoins d'arrêts de sédimentation. Le pendage est très faible, il n'y a aucune trace de plissement dans la région. La coupe est située à quelques dizaines de mètres seulement au-dessus de la transgression de la série du Bambuí (formation Sete Lagoas) sur une granodiorite du socle. Les micas de cette roche ont été datés du cycle orogénique transamazonique (G. Amaral, communication orale). L'argile est de l'illite pure dans quatre cas sur cinq. Seule la cinquième fraction, A 636, contient environ 20% de chlorite. L'indice de cristallinité est de $6,7 \pm 0,6$. Il correspond à une diagenèse déjà assez intense. L'âge de la biotite de la granodiorite sous-jacente semble indiquer que le socle est stable depuis une date antérieure au dépôt du Bambuí supposé précambrien supérieur. L'âge de cette biotite est en effet plus ancien que les valeurs obtenues dans le groupe Chapada Diamantina (B. Brito Neves, communication orale) bien que la corrélation entre les horizons calcaires du Groupe Bambuí dans l'état de Bahia et le calcaire Sete Lagoas dans l'état de Minas Gerais ne soit pas parfaitement établie.

La Figure 2 montre que les points de la roche totale calcaire et de quatre des fractions



finas sont alignés. (A 640 a dû être extraite par décarbonisation et son point n'est pas sur la droite. L'action de l'acide chlorhydrique, même dilué, a provoqué la perte d'une fraction du ^{87}Sr radiogénique. Un exemple identique a déjà été montré par Clauer, 1973). L'âge obtenu, 619 ± 17 m.a., ne correspond pas à l'âge présumé. Mais cet âge est bien connu sur tout le pourtour du bassin du São Francisco car il date la phase majeure de l'orogénèse brésilienne (Cordani *et al.*, 1968; Delhal *et al.*, 1969; Almeida *et al.*, 1973).

L'ordonnée à l'origine de l'isochrone: 0,7084 correspond aux valeurs observées par ailleurs dans des formations sédimentaires précambriennes (Bonhomme *et al.*, 1965; Clauer, 1976). Cette valeur basse ne montre pas la redistribution du strontium 87 radiogénique normalement observée lors de diagenèses ou métamorphismes tardifs et qui se traduit par une élévation du rapport initial. Dans le cas de Januária, il faut noter que l'argile ne représente qu'une très faible proportion de la roche totale et que les concentrations en strontium des argiles et des carbonates sont respectivement de 20 à 30 ppm et de 1 000 ppm. Dans ces conditions la quantité de strontium 87 radiogénique formée dans la fraction argileuse entre la date du dépôt et celle de l'évènement tardif ne fait pas varier la composition isotopique du strontium des carbonates de manière significative lors de la redistribution isotopique liée à cet évènement. Les argiles du calcaire de la formation Sete Lagoas prélevés à Januária montrent que la série a subi une diagenèse relativement vigoureuse. L'âge obtenu date, à quelque distance, le métamorphisme lié à l'orogénèse brésilienne. L'affleurement de Januária n'est situé qu'à 50 km environ au nord de la coupe d'Apertado où l'indice de cristallinité est déjà typiquement anchimétamorphique, soit $5,1 \pm 0,4$. D'autre part, les deux échantillons à vermiculite de João Pinheiro sont situés sur l'alignement des prélèvements de Januária. Or les illites de João Pinheiro sont également anchimétamorphiques. Le diagramme isotopique montre donc que les illites de Januária se comportent comme les illites métamorphiques du bassin du São Francisco et à la même date, alors que leurs données minéralogiques ne permettent pas de les classer comme métamorphiques. Les polymorphes de l'illite des échantillons à illite pure ont été déterminés selon la technique utilisée par Dunoyer de Segonzac (1969). Le pourcentage d'illite $2M$ est de 50 à 70%. Ces argiles montrent ainsi l'effet d'un évènement thermique sensible. L'indice de cristallinité représente peut-être une moyenne entre des illites anchimétamorphiques, indice 4, et diagénétiques, indice 8 à 10. L'âge mesuré correspond à l'évènement responsable des transformations minéralogiques.

La coexistence entre ces deux types d'argiles peut s'expliquer, éventuellement, par le caractère particulier de la formation. Les lits millimétriques d'argile sont illitiques, les échanges chimiques y sont faciles et le schéma de Dunoyer de Segonzac (1969) peut s'appliquer. Au contraire, les argiles situées dans les lits calcaires peuvent conserver une nature plus smectitique, montrant alors un indice de cristallinité plus grand: 8 à 10.

Les calcaires de Januária ont subi une diagenèse contemporaine du métamorphisme lié à l'orogénèse brésilienne et qui a provoqué l'effacement de l'histoire sédimentaire des argiles contenues dans cette formation. L'espoir de dater directement le calcaire du Bambuí ne peut pas être satisfait à Januária.

Les argiles des échantillons du Bambuí provenant de Vazante sont anchimétamorphiques. Dans ces conditions, l'âge de 600 ± 50 m.a. publié par Amaral et Kawashita (1967) date le métamorphisme et non la sédimentation. Comme il s'agit de roches totales, la date de 600 m.a. correspond à la phase principale du métamorphisme (Cordani, *in* Mascarenhas, 1973b).

L'appartenance des points de João Pinheiro au diagramme isotopique de Januária ne serait pleinement établie que si une isochrone pouvait être tracée à João Pinheiro et qu'elle se confonde avec celle de Januária. Dans l'hypothèse où cette position ne serait

B. Cedro do Abaeté (19°15'06" S, 45°45'10" W) Parmi les trois sondages étudiés, le choix s'est porté sur le N° ASF e qui montre la coupe la plus complète. Les échantillons 756 et 757 contiennent de la smectite; 753 à 755, 758, 896 et 89 ont été prélevés dans le niveau à illite et chlorite; enfin les n.° 749 à 752 proviennent de la partie supérieure.

La Figure 3 montre la répartition des points d'analyse; y compris les roches totales R 753, R 754 et R 756. Les fractions fines illitiques ferro-magnésiennes et smectitiques sont alignées sur une droite. L'âge est de 445 ± 25 m.a. Les fractions fines où se trouve le mélange illite-chlorite avec parfois un peu de smectite se regroupent suivant un alignement. L'âge mesuré est de 553 ± 17 m.a. Enfin l'échantillon 753 montre, grâce au couple roche totale fraction fine, un âge de 607 m.a. Il y a une corrélation très étroite entre la nature de la fraction argileuse analysée et la position du point correspondant sur le diagramme isotopique. Par exemple les illites ferro-magnésiennes se comportent comme des biotites en ce sens qu'elles ne se ferment aux migrations isotopiques que lors des phases ultimes. De vraies biotites, datées dans des régions plus métamorphiques, livrent en effet le même résultat (Cordani *et al.*, 1968). Ce comportement analogue présente les mêmes avantages et inconvénients. Il est ainsi possible d'espérer dater dans une série très légèrement métamorphique, l'épisode le plus ultime même s'il est de faible intensité. Par contre, les illites ferro-magnésiennes ne permettent pas d'espérer dater les événements thermo-tectoniques anciens de la longue histoire d'un schiste polyphasé.

La smectite montre un comportement isotopique comparable. Les résultats obtenus par Clauer (1976) montrent que ceci était prévisible car la smectite se comporte le plus souvent en système ouvert, même dans les conditions de la sédimentation. Nous obtenons ici une information supplémentaire: les smectites d'origine métamorphique sont également très sensibles à tout phénomène thermo-dynamique, même modeste. Les illites alumineuses, au contraire, conservent leur état isotopique ancien. En particulier, l'échantillon 753 contient l'illite la plus transformée par le métamorphisme parmi les illites alumineuses (son indice de cristallinité est de 3,3, c'est-à-dire déjà épimétamorphique). Ils se trouve que l'âge RT/FF 753 est de 610 m.a. environ, c'est-à-dire voisin de l'âge de la phase que nous avons considérée ailleurs comme majeure. Ainsi il semble que les illites alumineuses les plus métamorphiques se comportent comme les muscovites et ne subissent pas les ouvertures isotopiques postérieures visibles sur les minéraux moins résistants.

Les résultats potassium-argon (données analytiques dans le Tableau III) confirment que les fractions fines ont subi des phénomènes tardifs. Par contre, il ne semble pas que les différences observées sur le comportement des argiles vis-à-vis du strontium, en fonction de leur chimisme, soient aussi accentuées. La dispersion de l'argon radiogénique est seulement plus ou moins importante selon que la fraction fine est plus ou moins ferro-magnésienne et smectitique. L'égalité des ordonnées à l'origine suggère que le système dans son ensemble s'est comporté comme un système clos après l'acquisition du rapport 87/86 initial égal à 0,719. Les fractions fines auraient alors subi les migrations isotopiques, non

Tableau III — Données isotopiques potassium-argon sur deux fractions fines de Cedro do Abaeté

N.° échantillon	K ₂ O, %	⁴⁰ Ar rad. (10 ⁻⁶ cm ³ /g NTP)	⁴⁰ Ar rad. %	Âge (m.a.)
A 753	5,30	104,4	94,3	516
A 756	5,08	91,7	92,7	478

pas à l'échelle de l'échantillon, mais au moins sur la distance de 50 m environ que parcourt le sondage étudié. La présence de plis, d'une schistosité et de micro-fractures, et surtout les bréchifications du niveau phosphaté (Guimarães et Dutra, 1969) peuvent expliquer la facilité de ces échanges isotopiques à distance dans une formation déjà métamorphisée à 610 m.a., sinon avant, et ayant encore subi au moins deux événements thermo-tectoniques à 550 et 450 m.a.

L'âge de 610 m.a. correspond à la phase majeure de l'orogénèse brésilienne. Il doit être comparé aux chiffres obtenus à Januária, João Pinheiro et Vazante. Les autres résultats font partie du cortège de phases terminales: post-tectonique à 550 m.a. et thermique ultime à 450 m.a.

CONCLUSION L'étude des argiles des sédiments reposant en discordance sur le craton du São Francisco dans les états de Minas Gerais et Bahia a montré que l'influence du métamorphisme lié au cycle orogénique brésilien est plus étendue que l'aspect des sédiments sur le terrain ne le laissait prévoir. Seule la région centrale du bassin du Minas Gerais au nord de Januária semble exempte de métamorphisme.

Deux faits remarquables sont à noter en ce qui concerne la minéralogie des argiles: la présence de vermiculite d'origine métamorphique dans la région João Pinheiro-Pirapora et l'existence de smectite métamorphique dans les horizons calcaires du gisement de phosphate de Cedro do Abaeté.

La datation des calcaires noirs de la formation Sete Lagoas effectuée à Januária a fourni un âge de 620 m.a. correspondant à la phase majeure de l'orogénèse brésilienne. La diagenèse, peu sensible sur les caractéristiques minéralogiques de l'illite, a été suffisante pour effacer l'âge de la sédimentation. Des âges identiques ou voisins ont été obtenus à Vazante, Cedro do Abaeté et João Pinheiro. Comme l'âge de 600 m.a. environ date le métamorphisme, la sédimentation du Groupe Bambuí et des séries qui lui sont plus ou moins liées doit se situer avant cette date. L'appartenance du Bambuí au Précambrien Supérieur est donc démontrée.

Remerciements Ce travail fait partie du projet PIG N.º 99 "Corrélation Géochronologique du Précambrien des Zones Stables", soutenu par l'UNESCO. Je remercie les Drs. U. G. Cordani, K. Kawashita, E. Wernick et J. de F. Mascarenhas pour la conduite sur le terrain et les Drs. U. G. Cordani, A. Novikoff et N. Clauer pour une lecture critique du manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- ABBAS, M. — 1974 — Métamorphisme des argiles dans le Rhétien des Alpes Sud-Occidentales. Etude minéralogique et géochimique. Thèse Doc. Spécialité, Géol., Univ. L. Pasteur, Strasbourg, 73 pp.
- ALMEIDA, F. F. M. de — 1967 — Origem e evolução da plataforma brasileira. Div. Geol. Min., DNPM, Bol. 241: 36 pp.
- ALMEIDA, F. F. M. de, AMARAL, G., CORDANI, U. G. et KAWASHITA, K. — 1973 — The precambrian evolution of the South American cratonic margin south of the Amazon River. In "The oceans basins and margins" Vol. 1, Ed. by Nairn, A. E. M. and Stheli F. G., Plenum Publishing Corp.: 411-446
- AMARAL, G. et KAWASHITA, K. — 1967 — Determinação da idade do Grupo Bambuí pelo método Rb-Sr. Bol. Paranense Geoc. 26: 214-217
- BONHOMME, M. et CLAUER, N. — 1972 — Possibilités d'utilisation stratigraphique des datations directes Rb-Sr sur les minéraux et les roches sédimentaires. Mém. Bur. Rech. Géol. et Min. (France), 77: 943-950

- BONHOMME, M. et WEBER, F. — 1976 — Etude géochronologique de sédiments carbonatés anchimétamorphiques du Précambrien supérieur à Bakouma (République Centre-Africaine) **18(4)**: 243-252
- CLAUER, N. — 1973 — Utilisation de la méthode Rb-Sr pour la datation de niveaux sédimentaires du Précambrien supérieur de l'Adrar mauritanien (Sahara occidental) et la mise en évidence de transformations précoces des minéraux argileux. *Geochim. Cosmochim. Acta* **37**: 2 243-2 255
- CLAUER, N. — 1975 — Dating of sedimentary minerals and rocks: Possibilities of the Rb/Sr method and application to the Upper Precambrian from the West African craton. Symposium: Correlation of the Precambrian, Moscow, sept. 1-6, 2 pp.
- CLAUER, N. — 1976 — Les isotopes du strontium dans les minéraux et les roches sédimentaires. Application à l'étude géochronologique des séries azoïques précambriennes de l'Afrique de l'Ouest (titre provisoire). *Mém. Sci. Géol., Strasbourg* (à paraître)
- CLOUD, P. et DARDENNE, M. — 1973 — Proterozoic age of the Bambuí Group in Brazil. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **84(5)**: 1 673-1 676
- CORDANI, U. G., MELCHER, G. C. et ALMEIDA, F. F. M. de — 1968 — Outline of the Precambrian geochronology of South America. *Canad. J. of Earth Sc.*, **5**: 629-632
- DELHAL, J., LEDENT, D. et CORDANI, U. G. — 1969 — Ages Pb/U, Sr/Rb et Ar/K des formations métamorphiques et granitiques du Sud-Est du Brésil (Etats de Rio de Janeiro et de Minas Gerais). *Annal. Soc. Géol. Belgique*, **92**: 271-283
- DUNOYER de SEGONZAC, G. — 1969 — Les minéraux argileux dans la diagenèse. Passage au métamorphisme. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **29**, 339 pp.
- ESQUEVIN, J. — 1969 — Influence de la composition chimique des illites sur leur cristallinité. *Bull. Centre Rech. Pau, S.N.P.A.*, **3**: 147-154
- FERREIRA, E. O. — 1972 — Tectonic map of Brazil. Explanatory Note. Departamento Nacional da Produção Mineral, *Bol.* **1**: 14 pp.
- GUIMARÃES, D. et DUTRA, C. V. — 1969 — Contribuição ao estudo da série Bambuí. *Div. Geol. Min., D.N.P.M., Bol.* **243**; 27 pp.
- ISOTTA, C. A. L., ROCHA-CAMPOS, A. C. et YOSHIDA, R. — 1969 — Striated pavement of the upper Pre-Cambrian glaciation in Brazil. *Nature* **222** (5 192): 466-468
- KUBLER, B. — 1966 — La cristallinité de l'illite et les zones tout-à-fait supérieures du métamorphisme. *In Colloque sur les étages tectoniques*, Neuchâtel, 105-122
- LUCAS, J. — 1962 — La transformation des minéraux argileux dans la sédimentation. Etudes sur les argiles du Trias. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **23**: 202 pp.
- MARCHESE, H. G. — 1974a — Litoestratigrafia y petrología del grupo Bambuí en los estados de Minas Gerais y Goiás, Brasil. *Rev. Bras. Geoc.* **4(3)**: 172-190
- MARCHESE, H. G. — 1974b — Estromatolites "Gymnosolenidos" en el lado oriental de Minas Gerais. *Brasil. Rev. Bras. Geoc.* **4**: 257-271
- MASCARENHAS, J. de F. — 1973a — A geologia do Pré-Cambriano do Norte da Bahia; Oeste de Sergipe. *Anais XXVII Cong. Bras. Geol.*: 151-156
- MASCARENHAS, J. de F. — 1973b — A geologia do Centro-Leste do Estado da Bahia. *Anais de XXVII Cong. Bras. Geol.*: 35-66
- PAQUET, H. — 1970 — Evolution géochimique des minéraux argileux dans les altérations et les sols des climats méditerranéens tropicaux à saisons contrastées. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, **30**: 202 pp.
- PRÉVÔT, L. — 1968 — Application de la méthode Rb-Sr à l'étude de l'âge radiométrique de quelques dépôts devono-dinantiens du massif de la Bruche (Vosges du Nord). Thèse Doct. Spécialité. *Géol. Strasbourg*, 64 pp.
- SMITH, A. G. — 1964 — Potassium-argon decay constants and age tables. In "Phanerozoic Time Scale", *Quart. J. Geol. Soc. London* **123 S**: 129-141
- TARDY, Y. — 1969 — Géochimie des altérations. Etude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.* **31**: 199 pp.
- THIRY, M. — 1974 — Technique de préparation des minéraux en vue de l'analyse aux rayons X. *Trav. Centre Sédimentologie Géoch. Surf., Strasbourg*, 25 pp.