

## RELATIONS ENTRE TECTONIQUE, MÉTAMORPHISME ET MISE EN PLACE D'UN GRANITE ÉOHERCYNIEU A DEUX MICAS DANS LA CORDILLÈRE REAL DE BOLIVIE (MASSIF DE ZONGO-YANI)

BARD J.P.\*, BOTELLO R.\*\*, MARTINEZ C.\*\*\*,  
SUBIETA T.\*\*

*\*Département de Géologie, Faculté des Sciences  
Abidjan (Côte d'Ivoire)*

*\*\*Service Géologique de Bolivie  
Casilla 2797, La Paz (Bolivie)*

*\*\*\*Géologue de l'ORSTOM et Département  
de Géologie, Faculté des Sciences,  
Casilla 2977, La Paz (Bolivie)*

### RÉSUMÉ

Les terrains métamorphiques ordoviciens et siluro-dévonien de la Cordillère Real de Bolivie sont traversés, dans la région de Zongo-Yani (NNW de La Paz), par des roches granodioritiques andines et par un granite orienté à deux micas. L'analyse microstructurale et pétrographique de ce granite et de son encaissant montre qu'il s'agit d'une intrusion pén-contemporaine d'une phase tectogénique avec schistosité et métamorphisme éohercynien. Un essai de zonéographie dans les métapélites paléozoïques fait apparaître un dispositif thermique apparemment centré sur l'orthogneiss granitique.

Si nous considérons l'évolution du métamorphisme en direction du granite à deux micas dans le NW du massif de Zongo, nous observons le développement prograde de biotite, d'andalousite et de cordiérite. Si nous considérons cette évolution dans le SE du massif de Zongo, nous observons le développement de biotite, d'andalousite, de staurotide-grenat, et de sillimanite. Deux séries de sous-faciès AFM de « basse pression » semblent se paralléliser dans le massif étudié, mais l'apparition de la staurotide et du grenat au lieu de cordiérite dans la mésozone pourrait refléter un simple effet de matrice dans les métasédiments ordoviciens. L'andalousite et la cordiérite étant dans leur ensemble plus précoces que la staurotide, cela pourrait signifier que le type de métamor-

phisme éohercynien de Zongo a varié localement dans le temps et possiblement dans l'espace en réponse à une augmentation des effets de la pression moyenne (Pm) variable. La zone de la sillimanite a une extension périgranitique très limitée et ce minéral se développe dans des métasédiments muscovitisés et tourmalinisés dans lesquels la staurotide et l'andalousite constituent des phases métastables. Cette observation suggère que le granite à deux micas et ses phénomènes deutéritiques connexes soient venus télescoper un dispositif thermique mésozonal d'extension régionale pendant la phase tectonique éohercynienne.

### SUMMARY

The Ordovician and Siluro-Devonian metamorphic rocks of the Bolivian Cordillera Real are intruded by granodioritic Andean rocks and by a orthogneissic two mica granitic in the Zongo Yani area (NW of La Paz). Petrographical and microstructural analysis of this granite and its surrounding rocks show that the intrusion the synhistosity deformation and the metamorphism are eohercynian. Metamorphic zoning in Palaeozoic metashales indicates that the thermal structure is centered on the orthogneissic two mica granite.

As one approaches the two mica granite NW of Zongo the prograde development of biotite, anda-

lousite and cordierite is seen. To the SE of the Zongo area, biotite, andalusite, staurolite-garnet and sillimanite occur. These seems to be two series of low pressure AFM subfacies in this area but the appearance of staurolite and garnet in place of cordierite in the mesozone may possibly reflect a host-rocks composition effect in the Ordovician metasediments. The fact that andalusite and cordierite are earlier than staurolite may mean that the Zongo eohercynien metamorphism varied locally in age and perhaps spatially due to an increase of the medium-pressure ( $P_m$ ) variable. The sillimanite zone has very restricted development around the granit, the mineral appearing in muscovite and tourmaline bearing metasediments in which staurolite and andalusite as metastable phases. This observation suggests that the two mica granites and its associated deuteric phenomena produced a telescoping effect in this regional mesozonal thermal structure during the eohercynien tectonic phase.

#### ZUSAMMENFASSUNG

Das ordovizeheische sowie siluro-devonische Metamorphikum der Cordillere Real in Bolivien ist in der Gegend von Zongo-Yani (NNW von La Paz) von andischen granodioriten und orientiertem Zweiglimmer Granit intrudiert die kleintektonische Analyse dieses Granites und seiner Umgebung zeigt, dass es sich um eine Intrusion handelt die fast gleichzeitig eingelegt wurde mit einer tektogenen Phase mit Schieferung und frühvariskischem Metamorphismus. Eine Anstellung der Zonierung, in den palaeozoischen Metapeliten bringt ein thermisches Verhalten zum Ausdruck, dass offensichtlich auf den granitischen Orthogneiss zentriert ist.

Wenn wir die Entwicklung der Metamorphose (in Richtung auf den Zweiglimmer Granit) im NW des Zongomassifs betrachten, beobachtet man eine aufsteigende Ausbildung von Biotit, Andalusit, Staurolith, Granat, und Sillimanit.

Zwei Serien des Unterfazies AFM « geringen Druck » scheinen im untersuchten Massif nebeneinander zulaufen, aber das Auftreten des Stauroliths und des Granats an stelle von Cordierit in der Mesozone könnte eine einache Auswicklung der Matrix in den ordovizischen Metasedimenten widerspiegeln. Dass der Andalusit und der Cordierit insgesamt früher gebildet sind als der Staurolith, könnte bedeuten, dass der Typ des frühvariskischen Metamorphismus von Zongo lokal zeitlich variierte und vielleicht auch

im Raum, als eine Reaktion auf die Steigende Wirkung des Veranderlichen Drückens ( $P_m$ ).

Die Sillimanitzone hat um den Granit herum eine sehr beschränkte Ausdehnung. Dieses Mineral bildet sich in muskovitisierten und tourmalinisierten Metasedimenten, in denen Staurolith und Andalusit metastabile Phasen bedeuten. Diese Beobachtung führt zu der Annahme, dass der Zweiglimmer Granit und seine einhergehende Erscheinungen während der frühvariskischen tektonischen Phase mesozonal thermische Bedingungen regionaler Ausbreitung überlagerte.

#### RESUMEN

Los terrenos metamórficos ordovícicos y siluro-devónicos de la Cordillera Real de Bolivia son intruidos en la región de Zongo-Yani (NNW de La Paz) por rocas granodioríticas andinas y por un granito orientado con dos micas. El análisis microestructural y petrográfico de este granito y de su caja muestra que se trata de una intrusión penecontemporánea de una fase tectónica con esquistosidad y metamorfismo eohercínica. Un intento de zoneografía en las metapelitas paleozoicas hace aparecer por otra parte un dispositivo térmico aparentemente centrado sobre el ortogneiss granítico.

Se observa así el desarrollo progrado de biotita, de andalusita, de cordierita o de biotita, de andalusita, de estaurolita-granate y de sillimanita sea que consideramos la evolución del metamorfismo (en dirección del granito con dos micas) en el NW o sea que la consideramos en el SE del macizo de Zongo. Dos series de subfacies AFM de « baja presión » parecen paralelizarse en el macizo estudiado pero la aparición de la estaurolita y del granate en lugar de la cordierita en la mesozona podría reflejar un simple efecto de matrix en los metasedimentos ordovícicos. La andalusita y la cordierita siendo en su conjunto más precoces que la estaurolita, eso podría significar que el tipo de metamorfismo eohercínico de Zongo ha variado localmente en el tiempo y posiblemente en el espacio en respuesta a un aumento de los efectos de la variable  $P_m$ . La zona de la sillimanita tiene por otra parte una extensión perigranítica muy limitada y este mineral se desarrolla en metasedimentos muscovitizados y turmalinizados en los cuales la estaurolita y la andalusita constituyen fases metaestables. Esta observación sugiere que el granito con dos micas y sus fenómenos deutéricos conexos hayan venidos « telescopados » un dispositivo térmico mesozonal de extensión regional durante la fase tectónica eohercínica.

## РЕЗЮМЕ

Авторы изучают метаморфическую заключающую породу гранита с двумя слюдами, в массиве Зонго-Яни, выходящего на поверхность в ордовикских и силуро-девонских горах Кордильеры Реал, в Боливии. Они доказывают, что гранит этот был размещён во время эогерцинской, в то же время метаморфической и сланцеватой, фазы, и что интрузия произвела вторжение термического эпи-мезозонального механизма местного распространения. Подробный анализ отношений кристаллизация-деформация показывает, что тип метаморфизма изменился в течение тектогенетического процесса в сторону возрастающего увеличения среднего давления.

Dans les Andes de Bolivie, les roches plutoniques sont localisées dans la partie septentrionale de la Cordillère Orientale où elles constituent les intrusions granitiques et granodioritiques des cordillères « Apolobamba, Real, Quimsa Cruz et Santa Vera Cruz » (du nord-ouest au sud-est dans la figure 1).

Le secteur étudié se situe dans la Cordillère Real, au nord de La Paz et, plus précisément, dans la région délimitée par les localités de Zongo et de Yani.

## 1. — CADRE STRATIGRAPHIQUE ET STRUCTURAL

Dans cette région (fig. 2), le socle précambrien et la base des terrains paléozoïques n'affleurent pas. La majeure partie des terrains observés est constituée par du Paléozoïque inférieur plissé et métamorphisé au cours de la tectogénèse hercynienne et repris dans les déformations andines ultérieures. Ces terrains sont surmontés par du Mésozoïque et du Cénozoïque discordants. Ils sont traversés par divers intrusifs granitiques dont un *granite orienté à deux micas hercynien* et des granodiorites andines.

Le Paléozoïque de la Cordillère Real comprend une série qui va de l'Ordovicien moyen au Dévonien moyen (MARTINEZ *et al.*, 1971). Cette série est interrompue, à la limite de l'Ordovicien et du Silurien, par des mouvements épirogéniques responsables des lacunes de l'Ashgillien et de la base du Llandoveryen. Les termes les plus récents du Dévonien ainsi que le Permo-carbonifère ont été érodés. Des observations dans d'autres secteurs de la chaîne peruano-bolivienne ont montré que les phases de plissement sont successivement d'âge dévonien supérieur à carbonifère inférieur et permien moyen (MEGARD *et al.*, 1971).

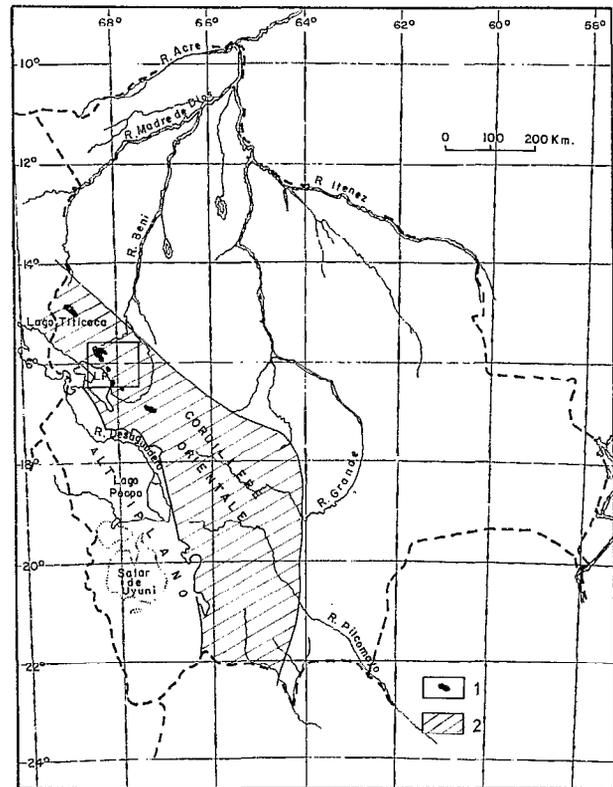


FIG. 1. — Carte de situation des intrusions granitiques en Bolivie :

- I. Massifs granitiques non différenciés,
- II. Terrains hercyniens de la Cordillère Orientale.

Au point de vue lithologique, le Paléozoïque de la Cordillère Orientale des Andes boliviennes est essentiellement constitué de terrains pélitiques et grésopélitiques qui donnent une série de plus de 10 000 m d'épaisseur.

L'ensemble de cette série a été intensément plissé au cours de la tectogénèse hercynienne ; la déformation principale est éohercynienne. Dans la région de Zongo-Yani, deux phases de plissement se sont superposées :

— La première phase est la phase majeure. Elle est responsable de la déformation la plus intense et de plus grande extension. Elle se caractérise par des plis droits à toutes les échelles qui, dans le nord de la Cordillère Orientale, dessinent un vaste anticlinorium de direction W.N.W. - E.S.E. Une schistosité et un métamorphisme régional se développent au cours de cette phase.

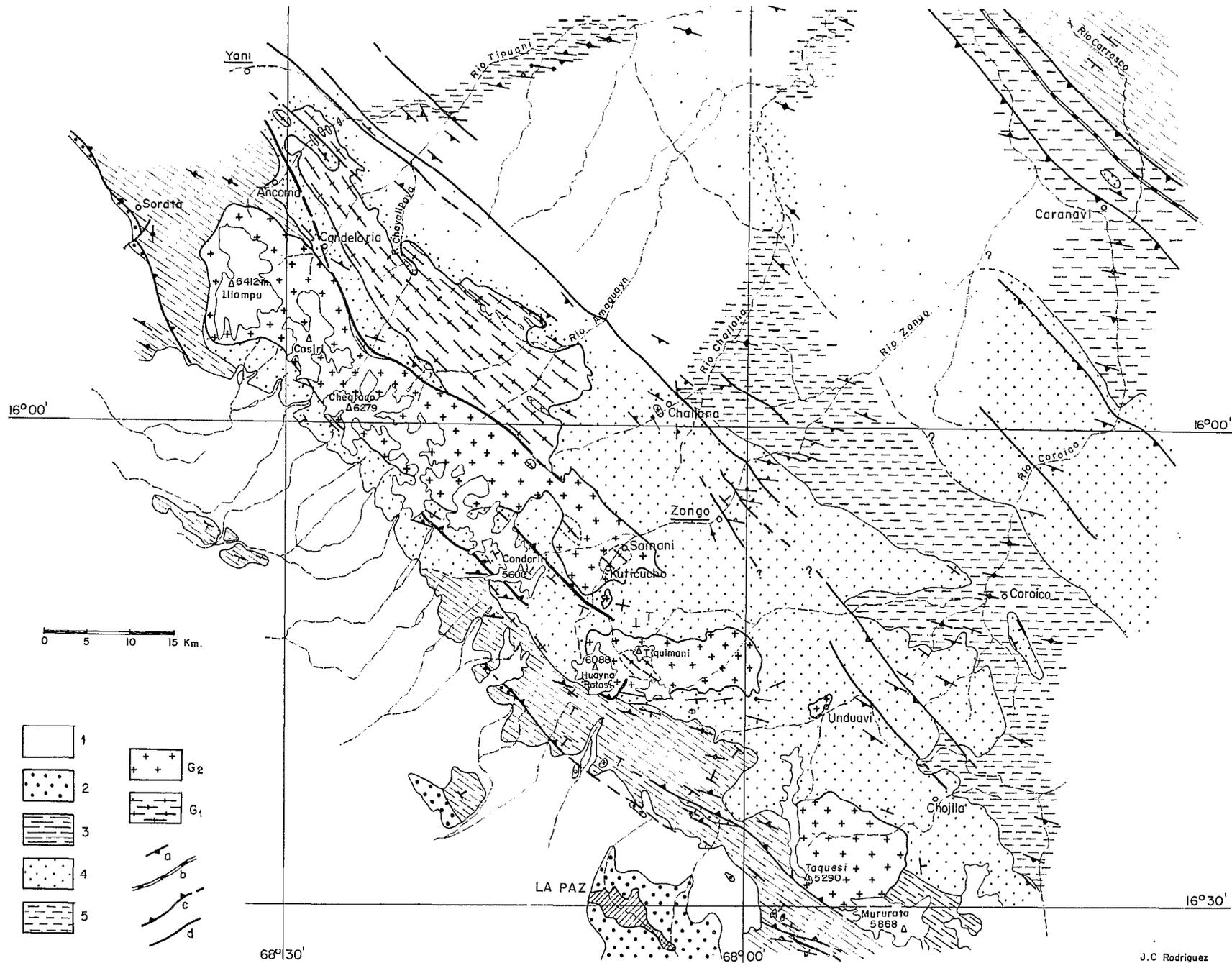


FIG. 2. — Carte géologique du Massif de Zongo-Yani (Cordillère Real, Bolivie) : 1. terrains récents ; 2. terrains andins ; 3. Siluro-Dévonien ; 4. Ordovicien supérieur ; 5. Ordovicien moyen ; G<sub>1</sub>, granites à deux micas hercyniens ; G<sub>2</sub>, granites andins ; a : schistosité ; b : front supérieur de schistosité ; c : failles inverses ; d : failles normales.

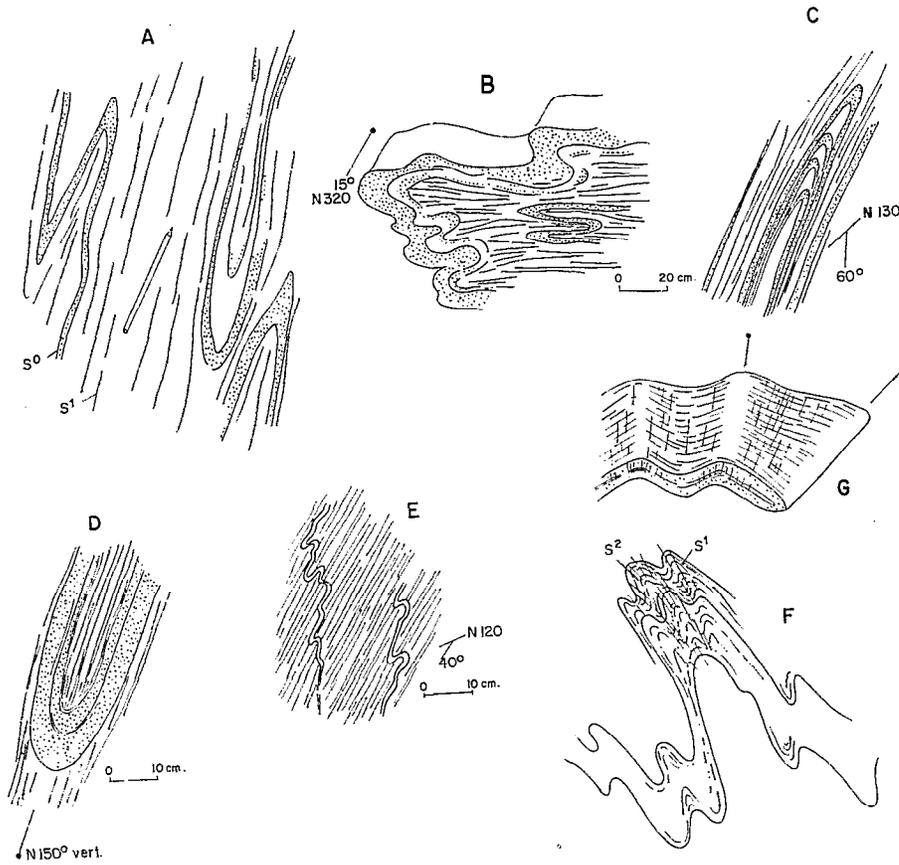


FIG. 3. — Structures mésoscopiques des phases I (A à G) et 2 (F et G) dans les métasédiments ordoviciens et siluriens du Zongo-Yani (So : stratification ; S<sub>1</sub> : schistosité de la phase 1 ; S<sub>2</sub> : schistosité de la phase 2).

Dans la région étudiée (Zongo-Yani), les structures qui lui sont dues sont des plis isoclinaux à plan axial subvertical (fig. 3). La schistosité (S<sub>1</sub>) est intense, sub-parallèle à la stratification (So). Le métamorphisme croît en intensité en se rapprochant du granite à deux micas, la série grésopélique est transformée en micaschistes et en gneiss. Ces roches métamorphiques furent observées pour la première fois par AHLFELD (in AHLFELD et BRANISA, 1960).

— La deuxième phase de plissement donne des structures sub-parallèles à la première phase. Elle est responsable de la déformation qui affecte les plis et la schistosité de phase I (fig. 3). Cette deuxième phase n'est connue, en Bolivie, que dans la région de Zongo-Yani. Elle se manifeste par des microplis à plans axiaux verticaux accompagnés d'une schistosité de fracture (S<sub>2</sub>) qui affecte les terrains sédimentaires paléozoïques et le granite à deux micas.

Postérieurement à cette tectogenèse hercynienne accompagnée de métamorphisme et de granitisation, la Cordillère Orientale devient zone « positive » jusqu'au Crétacé. Quelques affleurements de couches rouges secondaires et tertiaires sont discordants sur le versant sud de la Cordillère Real (fig. 2).

Les phases tectoniques andines déforment ces terrains ainsi que leur substratum paléozoïque. Elles se caractérisent par un style cassant donnant des failles inverses parallèles à la chaîne. Ces failles sont souvent conjuguées mais, sur le versant sud de la Cordillère Real, le déversement est essentiellement vers le sud-ouest avec basculement des structures hercyniennes (MARTINEZ, 1972).

Des massifs de granodiorites et d'adamellites (KOZŁOWSKI et SMULIKOWSKI, 1934) sont intrusifs dans les terrains paléozoïques. Postérieurs à la tectonique

hercynienne, ces granites andins sont fortement déformés par les phases tangentielle andines (fig. 6).

## 2. RELATIONS ENTRE TECTONIQUE ET METAMORPHISME DANS LES SCHISTES ORDOVICIENS

### 2.1. *Habitus et forme des minéraux du métamorphisme du Zongo*

Les métasédiments ordoviciens du Zongo-Yani présentent dans leur très grande majorité une schistosité de flux  $S_1$  parallèle à un bandage  $S_0$  d'origine sédimentaire (alternance plissée isoclinale de méta-ampélites et de lits quartzitiques).

Sur le terrain on observe souvent que la transposition de  $S_0$  en  $S_1$  n'a pas provoqué de grandes désorganisations structurales dans les microrhythmes d'origine sédimentaire ; on note en effet fréquemment des blastèses de biotites ou de cordiérites dans des lits ou dans des surfaces très fines mimétiques de microstratifications entrecroisées ou mimétiques de microstructures telles que des microslumps ou des micro-load casts.

L'étude détaillée des relations entre blastèse et schistogenèse montre que ces deux processus sont grosso modo synchrones mais ont duré respectivement assez longtemps pour que l'on puisse suivre une évolution progressive et spécifique de la cristallisation pendant la déformation.

L'analyse de la forme des phénoblastes et de la géométrie de leurs inclusions sigmoïdes (= hélicitiques au sens anglais) permet en effet de dégager les caractères suivants :

#### (a) *Les biotites*

Un des aspects remarquables des métamorphites du Zongo repose sur la *forme* et la *taille* des biotites (et parfois de certaines chlorites). Ces minéraux constituent des phénoblastes de 0,25 à 1 cm aux clivages (001) souvent obliques et contournés par la schistosité externe  $S_e^1$  de la matrice. Cet habitus confère ainsi macroscopiquement à la roche un aspect moucheté très caractéristique que l'on suit sur plusieurs dizaines (et peut-être centaines (1)) de kilomètres dans le Paléozoïque de la Cordillère Occidentale du Pérou.

Au microscope, les phénoblastes de biotite renferment des inclusions de graphite ou de quartz qui se distribuent suivant une structure planaire interne  $S_1^1$ .

(1) Paléozoïque moyen probable mésométamorphique de la région de Marcapata (W de Cuzco).

Cette structure planaire est fréquemment oblique sur  $S_e^1$  (fig. 4 A-B) ; elle dessine parfois des microplis qui se prolongent à l'extérieur du minéral de telle sorte qu'il y a continuité entre  $S_1^1$  et  $S_e^1$  ( $S_e^1$  n'étant apparemment pas déformée).

Ces caractères ajoutés au fait que les phénoblastes de biotite se présentent couramment comme des « yeux » moulés par la schistosité  $S_e^1$  (fig. 4 B) ou exceptionnellement comme des pœciliblastes *statiques* sur  $S_e^1$  prouvent qu'il s'agit de micas *syncinématiques relativement précoces*, autrement dit de minéraux qui ont cristallisé pour leur grande majorité avant la fin de la phase tectogénique syn- $S^1$  (2).

#### (b) *Les andalousites*

Les conclusions qui se dégagent de l'étude des andalousites du Zongo sont comparables à celles qui viennent d'être énoncées à propos des biotites. Dans la région étudiée, les andalousites constituent des prismes rosés de 0,5 à 5 cm de long moulés par la schistosité mésoscopique  $S^1$ .

Ces prismes vus en section basale donnent l'impression d'être maclés en croix. En réalité l'étude microscopique révèle qu'il s'agit de monocristaux prismatiques dont l'aspect cruciforme est dû au fait que le même cristal se présente avec un faciès homogène « normal » (donnant une croix) et un faciès fortement poecilitique, riche en inclusions, qui se cantonne aux angles du prisme d'andalousite (fig. 4 C).

Il est intéressant de noter que la partie « normale » et cruciforme des phénoblastes d'andalousite est fréquemment déchiquetée sous l'aspect de lanières distordues ; ces lanières sont alors finement ressoudées par un ciment andalousitique très riche en inclusions et optiquement indissociable des parties « normales » adjacentes.

Ce dispositif en lanières mis à part, il ressort que les andalousites du Zongo rappellent par leur habitus global les chistolites des métamorphismes *essentiellement thermiques*. La disposition géométrique particulière des inclusions graphiteuses dans les chistolites étant classiquement interprétées (DEER *and al.*, 1963, p. 133) comme une anisotropie directionnelle des vitesses de cristallisation, nous admettons que les andalousites du Zongo ont une morphologie liée à

(2) On notera à ce propos que  $S^1$  est déterminée dans les faciès biotitiques par l'agencement *quasi exclusif* de lèpidoblastes de muscovite et/ou de chlorite et qu'il n'y a pratiquement pas de biotites en aplat dans  $S^1$ . Les muscovites en grands pœciliblastes sont exceptionnelles sauf dans la zone de la sillimanite.

MISE EN PLACE D'UN GRANITE ÉOHERCYNINIEN À DEUX MICAS (BOLIVIE)

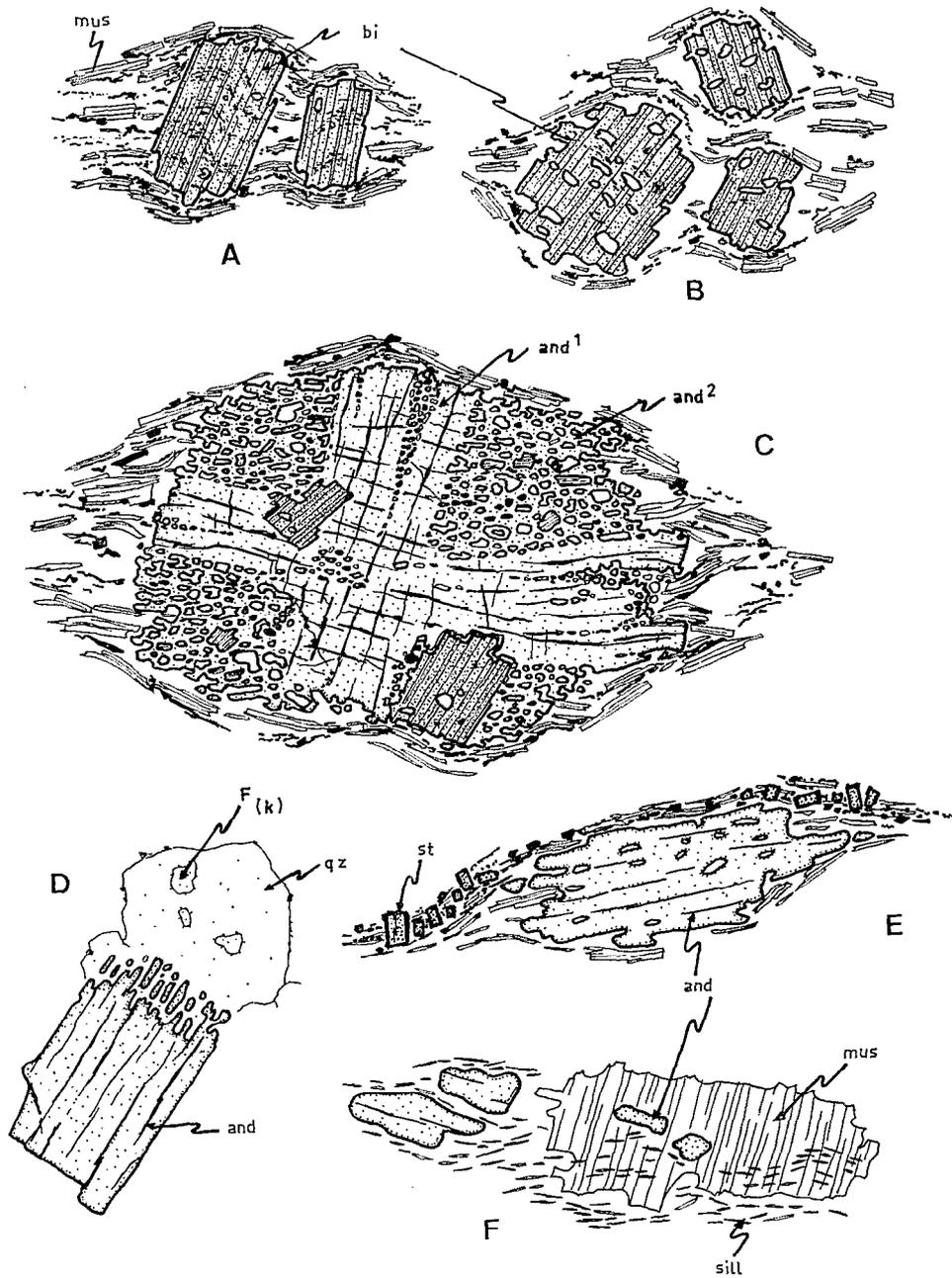
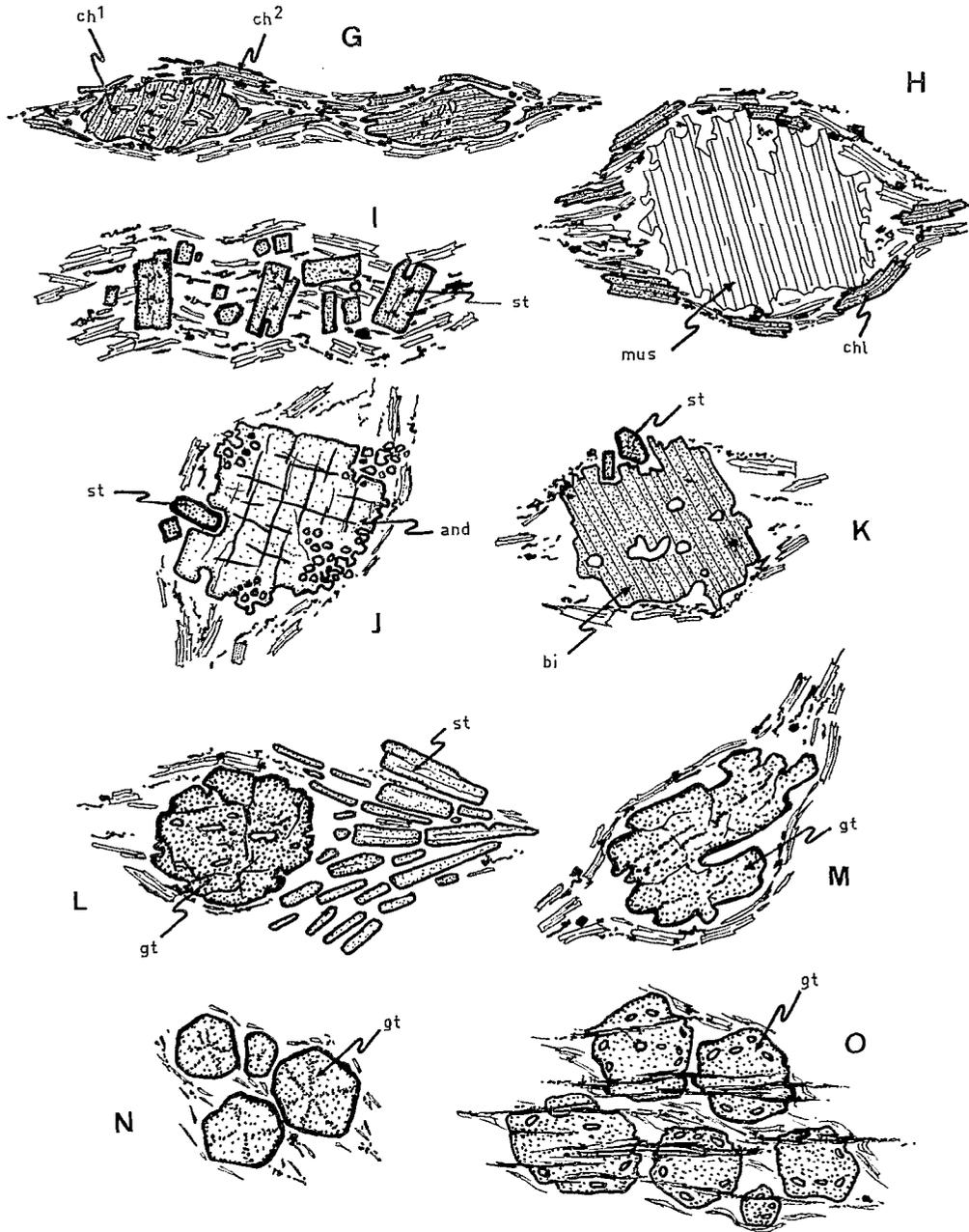


FIG. 4. — Habitus et microstructures présentés par les minéraux du métamorphisme hercynien des métapélites du Zongo-Yani (légende dans le texte) (grossissement 35 à 100).



l'interaction de ce phénomène, autrement dit que les parties normales sont relativement plus anciennes que les parties poecililitiques.

S'il en est ainsi, les découpages en lanières seraient dus à une phase de fracturation précoce (variété de *proctolase*) dans la blastèse des andalousites. Lors des stades plus avancés du développement de  $S^1$ , l'andalousite aurait continué à croître sous un habitus poecililitique de telle sorte que les parties « normales » ont tendance à présenter des caractères antéschisteux (moulées par  $S_e^1$ ) alors que les parties amiboïdes présentent des caractères synschisteux, voire même statiques sur  $S_e^1$ .

Le fait que les andalousites du Zongo puissent renfermer des poeciloblastes de biotite ou que ces deux minéraux puissent avoir des contacts interpénétratifs montre qu'il s'agit d'espèces à développement synchrone.

#### (c) *Les cordiérites*

L'habitus des cordiérites du Zongo varie suivant l'intensité du métamorphisme.

Dans les niveaux les moins métamorphiques la cordiérite (parfois maclée de façon polycyclique) forme des globules sphériques très riches en inclusions de quartz, de muscovite, de biotite et de graphite. Ces inclusions dessinent une schistosité  $S_i^1$  légèrement ondulée et qui se prolonge de façon continue dans la matrice micaschisteuse (continuité entre  $S_i^1$  et  $S_e^1$ ). On note toutefois que  $S_e^1$  a tendance, dans certains niveaux, à mouler les blastes cordiéritiques. Cette observation montrerait que les cordiérites ont des caractères statiques légèrement antérieurs à la fin de la schistogénèse.

Dans les zones les plus métamorphiques (zone à sillimanite) la cordiérite forme des prismes plus ou moins automorphes ou des plages denticulées xénomorphes et libres d'inclusions (si ce n'est des produits d'altération).

Les relations avec  $S^1$  sont difficiles à préciser ; il semble toutefois que ce minéral soit syn- ou tardicinématique.

#### (d) *Les staurotides*

Toutes les staurotides qui ont été examinées présentent des caractères post- $S^1$  et très exceptionnellement syn- $S^1$ .

Ces minéraux ne sont jamais précoces. Comme le montrent les figures 4 E, I, les staurotides forment le plus souvent des chapelets de très petits prismes rectangulaires statiques et équants sur  $S^1$ . Dans les niveaux où ce minéral a une taille relativement plus

grande (0,1/0,2 mm), il s'agit de gerbes de cristaux prismatiques (cf. fig. 4 L) ou de poeciloblastes renfermant une  $S_i^1$  dessinée par des tablettes de quartz et de muscovite. Cette  $S_i^1$  est continue avec  $S_e^1$ . Par ailleurs, les chapelets de staurotides décrits plus haut viennent parfois mouler les poeciloblastes précoces d'andalousite et de biotite. Certains prismes sont toutefois légèrement englobés (fig. 4 J, K) par ces minéraux ; cette figure indique soit que la cristallisation des micas et de l'andalousite s'est poursuivie légèrement après  $S^1$ , soit que la formation des staurotides a pu se faire à la faveur d'une réaction statique au détriment de ces silicates.

#### (e) *Les grenats*

Les grenats sont relativement rares et se présentent avec trois habitus principaux :

— en cristaux ovoïdes moulés par les muscovites de la matrice mais renfermant des inclusions hélicitiques de quartz sub-parallèles à la schistosité externe dessinée par ces micas blancs.

— en poeciloblastes xénomorphes tabulaires également moulés par  $S_e^1$  (fig. 4 M) et renfermant des grains orientés de graphites mimétiques d'une  $S_i^1$  légèrement oblique sur  $S_e^1$ .

— en cristaux sub-automorphes dans des horizons exceptionnels de « grenatite » ; les grenats renferment alors des inclusions charbonneuses qui se disposent dans le minéral le long des rayons d'une étoile à quatre ou six branches (fig. 4 N).

Les habitus précédents montrent que les grenats du Zongo sont précoces et qu'ils ont commencé à cristalliser légèrement après le début de la schistogénèse pour terminer leur croissance avant la fin de ce phénomène. Cette conclusion est en accord avec le fait que les parties poecililitiques d'andalousite englobent partiellement ce minéral et que les staurotides en gerbe ou en chapelet moulent ce dernier (fig. 4 L).

#### (f) *Les tourmalines*

Certains niveaux micaschisteux du Zongo renferment des poeciloblastes sub-automorphes de tourmaline vert-jaunâtre. Ces cristaux contiennent des inclusions globulaires de quartz qui leur confèrent un habitus syn-à tardi- $S^1$ .

#### (g) *Les sillimanites*

Les sillimanites se présentent sous le faciès fibrolitique en inclusion dans des grains de quartz, de cordiérite ou de muscovite corrodée (fig. 4 F). Les aiguilles sillimaniteuses sont vraisemblablement tardives par

rapport à  $S^1$  et correspondent à plusieurs processus réactionnels des micas et, peut-être, de certaines cordiérites et andalousites.

### 2.2. Interprétation et signification des microstructures

Les observations précédentes montrent que la blastèse des minéraux du métamorphisme dans les métasédiments ordovociens du Zongo-Yani a été un processus continu amorcé avant le paroxysme tectogénique et qui s'est poursuivi après cette phase de déformation. L'étude des microstructures présentées par divers minéraux critiques fait apparaître dans le détail des stades de blastèse maxima sensiblement différents (fig. 5) dont nous examinerons ultérieurement la

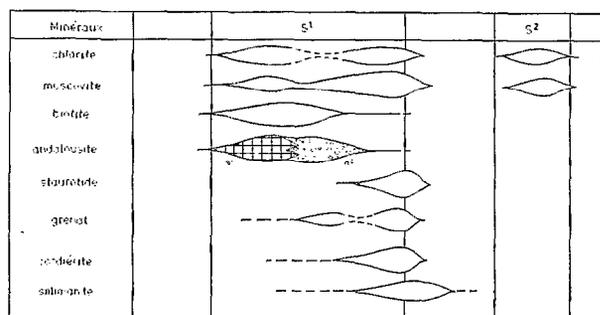


FIG. 5. — Ordre de cristallisation des minéraux du métamorphisme dans les métapélites du Zongo-Yani ( $S^1$  : schistosité de flux de la phase 1 (hercynien) ;  $S^2$  : schistosité de fractures de la phase 2 (andin ou hercynien tardif?) - ( $a^1$  : andalousite « normale » ;  $a^2$  : andalousite fortement poecilithique).

signification pétrogénétique. Un fait remarquable ressort toutefois dès à présent de cette étude microstructurale : les minéraux phénoblastiques du Zongo se sont développés de façon précoce par rapport à  $S^1$ . Le fait qu'il s'agisse en l'occurrence et tout particulièrement d'andalousite d'affinité chiastolitique et de cordiérite paraît avoir une signification précise (métamorphisme à haut gradient géothermique) en regard des blastes tardi - à post- $S^1$  surtout représentés par des staurotides, autrement dit par des minéraux dont les conditions de genèse sous-entendent en général des conditions barométriques plus élevées que l'andalousite et la cordiérite.

### 3. PETROGRAPHIE ET STRUCTURES DU GRANITE ORTHOGNEISSIFIÉ A DEUX MICAS DU ZONGO-YANI

Sur le terrain le granite à deux micas du Zongo-Yani se présente sous l'aspect d'un leuco-granite gneissifié où des yeux centimétriques de feldspath

et de quartz sont moulés par une schistosité frustrée, dessinée par des amas micacés et des flammes quartzo-feldspathiques.

Les contacts propres et non perturbés par des déformations cassantes post-schisteuses sont rares. On remarque toutefois que la schistosité de l'orthogneiss a la même direction et le même pendage (NE 70) que la schistosité  $S^1$  de l'encaissant métamorphique.

Il ne fait pas de doute que ces deux surfaces tectoniques ont le même âge car l'examen d'un contact entre les micaschistes et une injection pegmatitique écrasée à muscovite tourmaline-grenat (congénère du leucogranite orthogneissifié à deux micas) dans la vallée du Zongo montre qu'il y a continuité entre la foliation frustrée de la pegmatite et la schistosité de flux de l'encaissant.

Au microscope l'orthogneiss du Zongo est une roche constituée de quartz + microcline parfois perthitique + plagioclase An 18-20 + muscovite (10/12 % du mode) + biotite (> 10 %) ± sillimanite ± grenat ± tourmaline ± minéraux accessoires.

Tous ces constituants présentent des traces évidentes de déformation ruptuelle ou plastique.

Le quartz constitue des plages ovoïdes à extinction roulante et à pseudo-macle mécanique ; ces plages sont morcelées et cimentées (structure en mortier) par des grains quartzeux finement denticulés. Ces grains sont orientés sensiblement dans la même direction ( $S^1$  du granite). Des lamelles de muscovite et des petits cristaux xénomorphes de microcline et de plagioclase limpides et non déformés s'associent à ces agrégats quartzeux.

Les feldspaths potassiques anté-schisteux sont des microclines quadrillés généralement xénomorphes ; les plans de macle albite-péricline et carlsbad sont souvent distordus et flexueux. Comme pour les grandes plages de quartz on note que certains microclines sont morcelés et ressoudés par un mortier de quartz et de microcline secondaire.

Dans certains faciès franchement cataclastiques et relativement peu orientés, les microclines sont envahis par un chevelu de perthites maclées albite ; ce processus de remplacement est parfois très dense et le feldspath potassique est presque totalement pseudomorphosé en une albite en damier.

Les plagioclases primaires sont des oligoclases acides An 18-20 à tendance automorphique. Ces minéraux sont faiblement zonés et renferment des tablettes de petits plagioclases (An ?) et des baguettes de muscovite.

Les micas blancs sont tardifs et semblent appartenir à trois générations différentes. La première est représentée par des plages flexueuses à contour dactylitique avec le quartz (symplectite quartz-muscovite ou assemblage réactionnel  $q + mus. \rightleftharpoons sillimanite + F_{(K)} + H_2O$ ). La seconde par de petites lamelles fréquemment incluses dans les plagioclases et la troisième par des cristallites qui moulent les grains de quartz et de feldspath et s'orientent grosso modo dans le plan de foliation mésoscopique.

La biotite parfois chloritisée, toujours flexueuse est affectée de microplis (kink-structures) : ce mica est souvent épitaxitique avec la muscovite et tend à se réorienter mécaniquement le long de la foliation ou autour des « yeux » quartzo-feldspathiques.

La synthèse de ces observations indique que l'ortho-

gneissification du leucogranite du Zongo-Yani est un processus postérieur à la cristallisation des grands cristaux magmatiques ou tardimagmatiques de quartz, de microcline, de plagioclase et de biotite-muscovite épitaxique. Des recrystallisations syncinématiques (et synschisteuses) ont affecté ce matériel granitique et en particulier le quartz, les microclines et les muscovites de grande taille.

Cette observation montre que l'orthogneissification du leucogranite du Zongo est due à la surimposition d'une déformation tangentielle relativement chaude sur un magma acide qui était totalement cristallisé.

Cette période de déformation est également celle qui provoque les plissements synschisteux et symmétamorphes de l'encaissant ordovicien et, comme dans ce dernier, on retrouve les traces superficielles d'une

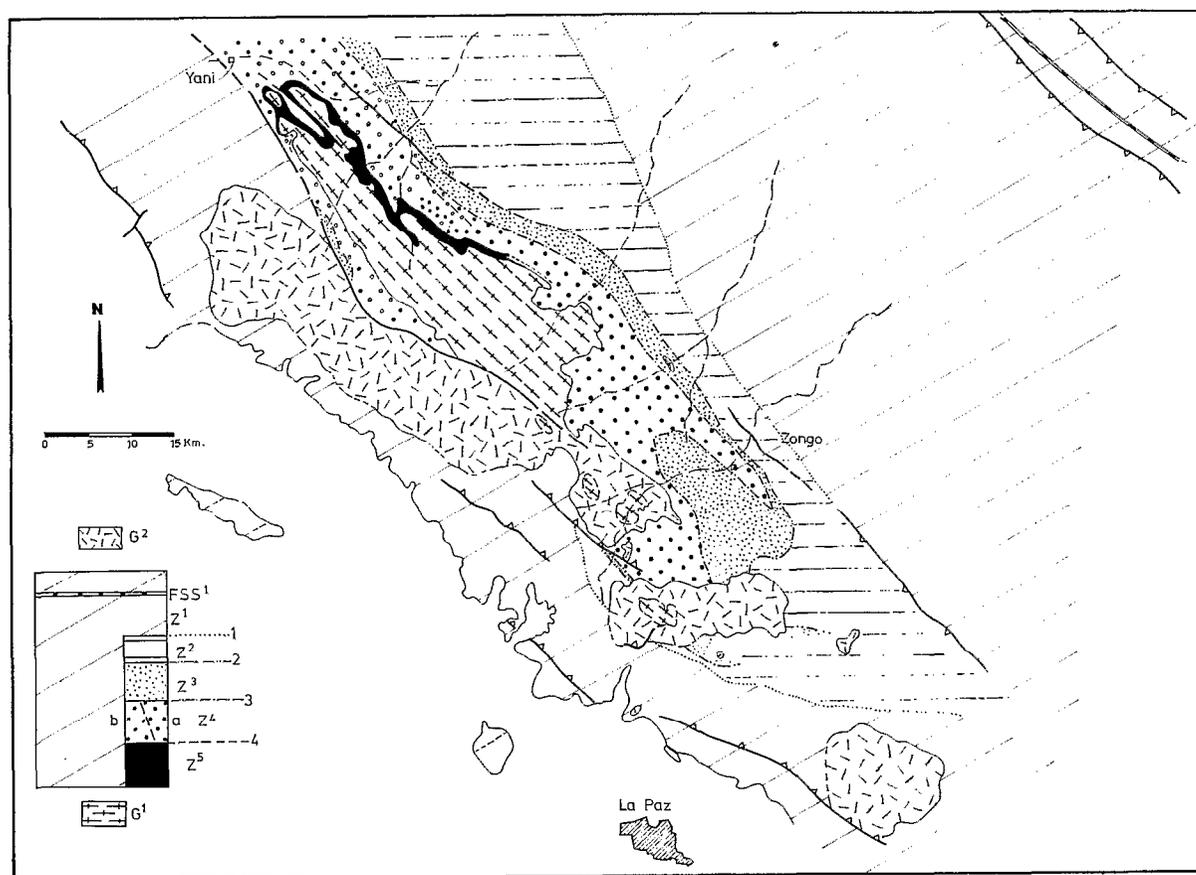


FIG. 6. — Carte zonéographique du Massif du Zongo-Yani ( $Z^1$  : métasédiments ordoviciens à siluriens épimétamorphiques ;  $Z^2$  : zone de la biotite ;  $Z^3$  : zone de l'andalousite ;  $Z^{4a}$  : zone de la sillimanite - 1 : isograde biotite (+) ; 2 : andalousite (+) ; 3 : staurotite ou cordiérite (+) ; 4 : sillimanite (+).  $G^1$  : granite orthogneissifié à deux micas (hercynien) ;  $G^2$  : granite calco-alcalin (andin) ;  $FSS^1$  : front supérieur de la schistosité de flux hercynienne.

cataclase (schistosité de fracture  $S^2$ ) non accompagnée de recristallisations si ce n'est, peut-être, la chloritisation des biotites.

LE MÉTAMORPHISME PROGRESSIF DANS LE ZONGOYANI ET SES RELATIONS AVEC LA MISE EN PLACE DU LEUCOGRANITE A DEUX MICAS

Les formations ordoviciennes métamorphiques du Zongo sont pour l'essentiel des roches d'origine péliitique ou ampélitique. Il est par conséquent possible de suivre leur évolution minéralogique prograde en traitant ces matériaux dans le système silico-alumineux AFMK de J.B. THOMPSON (1957). Pour ce faire il aurait été nécessaire de posséder des analyses chimiques des roches totales et des minéraux critiques ; ces informations nous manquant, il s'ensuit que nous nous bornerons simplement à dégager les traits majeurs du métamorphisme du Zongo et d'émettre certaines hypothèses que seules les analyses chimiques permettraient de vérifier.

4.1. Distribution zonéographique des minéraux critiques dans le Zongo

Nous avons disposé sur une carte les sites échantillonnés renfermant les minéraux critiques du système AFMK ; le tracé empirique des domaines renfermant ces phases permet de dégager les faits suivants (fig. 6) :

Sous le front supérieur de la schistosité  $S^1$ , il existe six zones principales de métamorphisme centrées sur l'orthoigneiss-granitique à deux micas ; en se dirigeant vers cet orthoigneiss on trouve en effet :

+ au NW

- une zone  $Z^1$  à chlorite-muscovite,
- une zone  $Z^2$  à chlorite-biotite,
- une zone  $Z^3$  à andalousite,
- une zone  $Z^{4b}$  à staurotide-grenat dans laquelle l'andalousite et la biotite sont stables,

- une zone  $Z^5$  à sillimanite-muscovite renfermant des associations à cordiérite.

+ au SE

- une zone  $Z^1$  à chlorite-muscovite,
- une zone  $Z^2$  à chlorite-biotite,
- une zone  $Z^3$  à andalousite,
- une zone  $Z^{4a}$  à cordiérite dans laquelle l'andalousite continue à être stable.

— entre ces deux secteurs, à la hauteur du Rio Chayollpaya, les zones  $Z^{4a}$  et  $Z^{4b}$  semblent se chevaucher ou se confondre partiellement ; on rencontre en effet dans ce rio des associations à staurotide-cordiérite-andalousite-biotite (+ quartz + muscovite).

— les surfaces « isogrades » qui délimitent les zones précédentes sont affectées d'ondulations qui miment des antiformes ou des synformes d'axe sensiblement parallèles aux structures de la phase I ; ainsi, dans la partie SE du secteur étudié, un dôme thermique anticlinorial montre dans son cœur des pointements d'orthoigneiss.

— enfin s'il existe cartographiquement une corrélation entre orthoigneiss et métamorphisme progressif des sédiments ordoviciens, on voit par contre que la mise en place des granites calco-alcalins andins est étrangère à ce métamorphisme, ce que l'on pouvait déjà envisager sur le terrain compte tenu du caractère post- $S^1$  de la mise en place de ces intrusifs récents.

Toutes ces remarques convergent vers une pénécotemporanéité entre déformation, métamorphisme et mise en place du granite à deux micas du Zongo-Yani. La tectogenèse des métasédiments ordoviciens étant antémésozoïque, il ressort donc dès à présent qu'il existe dans la Cordillère Royale de Bolivie des granitoïdes précoces et un métamorphisme hercyniens.

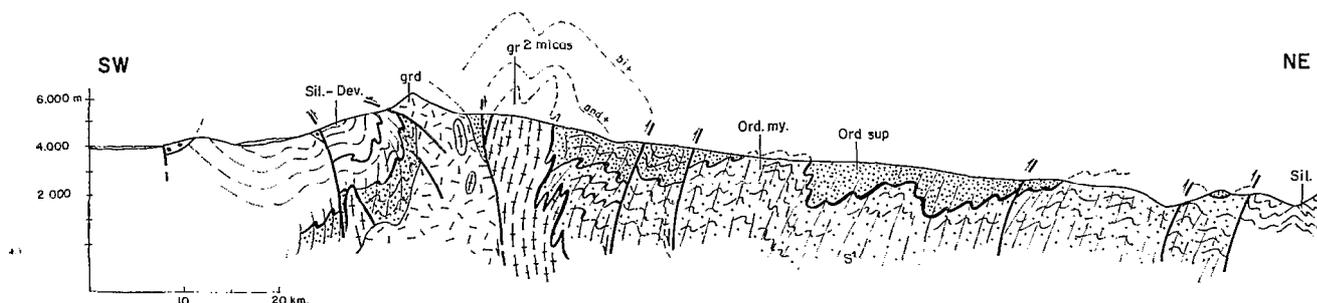


FIG. 7. — Coupe synthétique NE-SW du Massif du Zongo-Yani.

MISE EN PLACE D'UN GRANITE ÉOHERCYNIEN À DEUX MICAS (BOLIVIE)

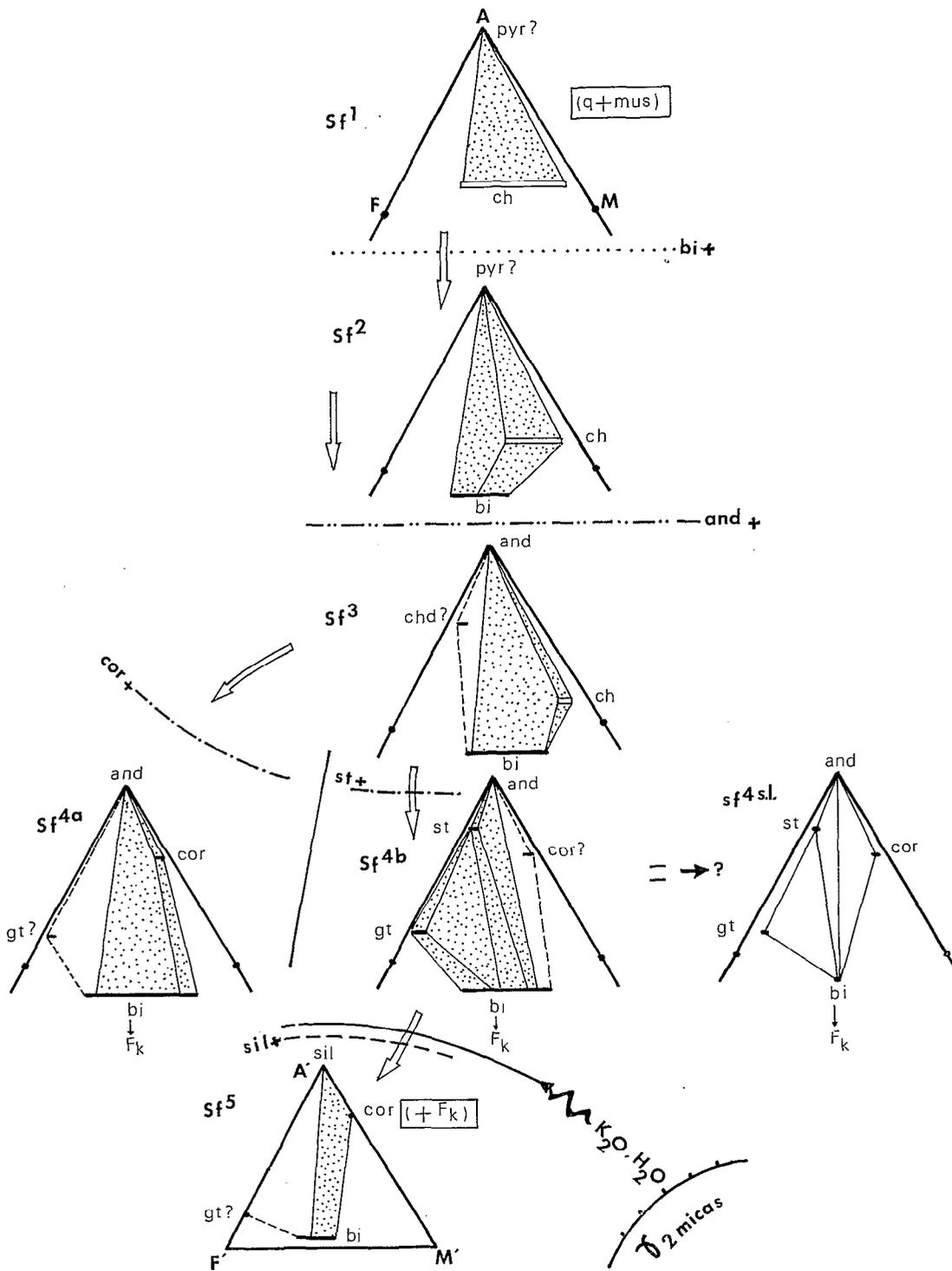


FIG. 8. — Suites de sous-faciès AFM de Thompson dans le Zongo-Yani (en pointillé les associations observées ; les lignes jointives entre les phases critiques ont un tracé arbitraire ; le sous-faciès s.f. 5 A'F'M' représente le triangle de base du tétraèdre A'F'M'K' dans un système où la muscovite n'est pas en équilibre avec le quartz ; les s.f. 4a et s.f. 4b pourraient définir deux séquences chimiquement différentes d'un sous-faciès s.f. 4 s.l.).

#### 4.2. Modalités du métamorphisme hercynien du Zongo-Yani

La méthode des sous-faciès AFM(K) de Thompson à laquelle il a été fait allusion plus haut, permet d'apporter quelques précisions sur la signification thermodynamique des zones métamorphiques qui environnent l'orthogneiss à deux micas.

Comme cela est illustré par la figure 8, nous avons figuré dans les triangles AFM les associations minéralogiques précoces à tardi-cinématiques des zones du secteur NW et SE. On supposera à priori que les assemblages à trois minéraux critiques (+ quartz + muscovite + albite) sont stables.

Sous le front supérieur de la schistosité S<sup>1</sup>, les schistes renferment des associations à chlorite précoce-chlorite tardive (Zone 1).

Dans la zone Z<sup>2</sup>, les assemblages typomorphes sont :

- chlorite-biotite,
- chlorite.

Nous n'avons pas rencontré de chloritoïde ni d'andalousite ; par contre certains paquets de mica blanc pouvaient être constitués de pyrophyllite (?).

Dans la zone 3, les assemblages typomorphes se regroupent dans un sous-faciès (s.f. 3) caractérisé par le joint andalousite-biotite ; la chlorite est encore stable sous les conditions de ce deuxième sous-faciès et il y a peut-être du chloritoïde.

Dans la zone 4 b, le joint andalousite-biotite subsiste mais il n'y a plus de chlorite ; le sous-faciès qui se développe dans cette zone (s.f. 4 b) est caractérisé par les associations observées :

- staurotide - biotite - andalousite,
- staurotide - biotite - grenat,
- staurotide - biotite,
- grenat - biotite.

Au SE, le sous-faciès qui fait suite au s.f. 3 est caractérisé par l'absence d'association à staurotide et/ou grenat et par la présence du joint cordiérite-andalousite avec les assemblages observés (s.f. 4<sup>a</sup>) :

- cordiérite - andalousite - biotite,
- cordiérite - biotite,
- andalousite - biotite.

Au niveau du Rio Chayollpaya, les métapélites renferment des associations à quatre phases critiques :

— staurotide - grenat - biotite - andalousite, (+ quartz + muscovite).

Ces associations sont problématiques et, compte tenu de l'échantillonnage qui est à notre disposition, deux hypothèses peuvent être émises :

— il s'agit soit d'un assemblage univariant représentant un état réactionnel,

— soit d'un assemblage qui renferme une phase métastable ; compte tenu des données de l'analyse microstructurale, il pourrait s'agir en l'occurrence du grenat (?) qui est ici précoce par rapport à S<sup>1</sup> (fig. 4 M).

Cette même zone « transitoire » renferme par ailleurs des associations à cordiérite (nettement précoce par rapport à S<sup>1</sup>) - biotite - staurotide (tardive sur S<sup>1</sup>) ; cette association n'est vraisemblablement pas en équilibre et nous doutons de l'existence d'un joint staurotide-cordiérite.

Alors que les conditions du métamorphisme dans la partie SE du Zongo semblent avoir atteint leur maxima par le sous-faciès Z<sup>4a</sup>, il n'en est pas de même plus au nord où l'on voit se développer de la sillimanite aux dépens de la biotite, de l'andalousite et, peut-être, de la cordiérite et de la muscovite.

Il semble que les conditions d'un sous-faciès de haut grade à sillimanite ont été atteintes dans ce secteur et cela très près de l'orthogneiss granitique à deux micas ; les associations répertoriées sont en effet les suivantes :

- sillimanite - microcline - cordiérite - andalousite - biotite (muscovite + quartz),
- sillimanite - cordiérite - biotite (muscovite + quartz),
- sillimanite - biotite - microcline (muscovite + quartz).

La première association n'est vraisemblablement pas en équilibre car la biotite et l'andalousite présentent respectivement des caractères réactionnels avec le quartz (fig. 4 D).

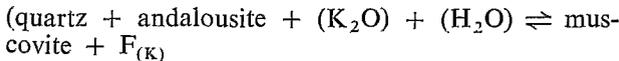
L'habitus en larges poeciloblastes denticulés pris par la muscovite suggère par ailleurs que ce minéral a pu se développer par métasomatose potassique. Ces muscovites blindent en outre des cristaux résiduels d'andalousite (fig. 5 F) et renferment de la fibrolite dont la genèse semble étrangère à la transformation du polymorphe précédent.

La conjonction de ces faits suggère une évolution complexe des conditions du métamorphisme à proximité immédiate du granite à deux micas ; cette

conjonction pourrait correspondre à la superposition des événements suivants :

— cristallisation précoce de cordiérite, d'andalousite et de biotite,

— blastèse tardive de muscovite (apports deutériques ?) et croissance de ce mica au détriment de l'association quartz-andalousite et suivant une réaction du type :



— réaction (peut-être couplée avec la précédente ?) ( $\text{quartz} + \text{muscovite} \rightleftharpoons \text{sillimanite} + \text{F}_{(\text{K})} + \text{H}_2\text{O}$ ).

La comparaison des deux suites apparentes de sous-faciès dans le Zongo montre (fig. 8) que ces suites diffèrent en particulier par le fait que l'une renferme des associations « magnésiennes » (suite à cordiérite) et l'autre des associations « ferrifères » (suite à grenat-staurotide). On peut alors se demander si la différenciation entre ces deux lignées de sous-faciès au niveau des zones  $Z^{4a}$  et  $Z^{4b}$  n'est pas en réalité le reflet d'une différenciation dans le chimisme global des métapelites ordoviciennes affleurant respectivement au NW et au SE du Zongo. L'absence de données chimiques ne permet pas actuellement de trancher la question.

Quoi qu'il en soit, il ressort que le métamorphisme du Zongo est un phénomène qui s'est effectué sous des conditions thermobarométriques comparables à celles des métamorphismes dits « de basse pression ».

Dans la mesure où le développement de la staurotide (et du grenat) n'est pas fortement contrôlé par un effet de matrice, on peut se demander à la lumière des observations microstructurales si la blastèse de la staurotide n'est pas la preuve que les conditions barométriques ont sensiblement évolué lors du métamorphisme. Dans ce cas, la cordiérite, l'andalousite et les blastes précoces de biotite auraient commencé à croître sous des conditions de  $P_m \neq P_{H_2O}$  plus basses au début qu'à la fin du métamorphisme. Les affinités chiastolitiques présentées par les andalousites indiqueraient alors que le métamorphisme avait, à ses débuts, des caractères plutôt « thermiques » ou, si l'on veut, « plutoniques ».

##### 5. SYNTHÈSE INTERPRÉTATIVE SUR L'ÉVOLUTION TECTONIQUE MÉTAMORPHIQUE ET MAGMATIQUE DU ZONGO-YANI

Les données de l'analyse structurale et pétrologique des séries ordoviciennes du Zongo et de l'intrusif granitique à deux micas qui caractérise ce secteur,

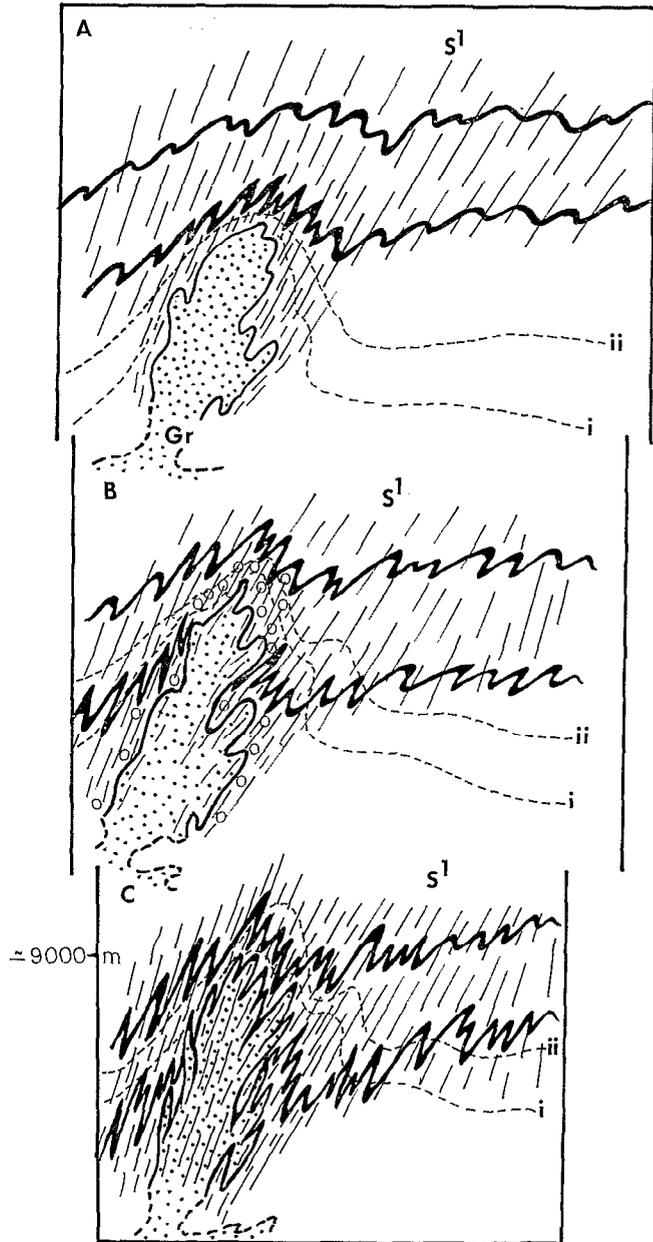


FIG. 9. — Mécanisme hypothétique de mise en place du granite syncinématique précoce à deux micas du Zongo-Yani. Stade A : début de l'intrusion granitique et du plissement sym-métamorphique ; Stade B : accentuation du processus de montée des isogrades (i et ii) en dôme autour du granite à deux micas et front de muscovitisation et de tourmalinisation périgranitique (o) ; Stade C : fin de la tectogenèse et orthogncissification mésozonale du granite à deux micas. On notera que le style de la déformation anisopaque est accentué à proximité immédiate du granite et que les isogrades forment une « hernie » autour du granite.

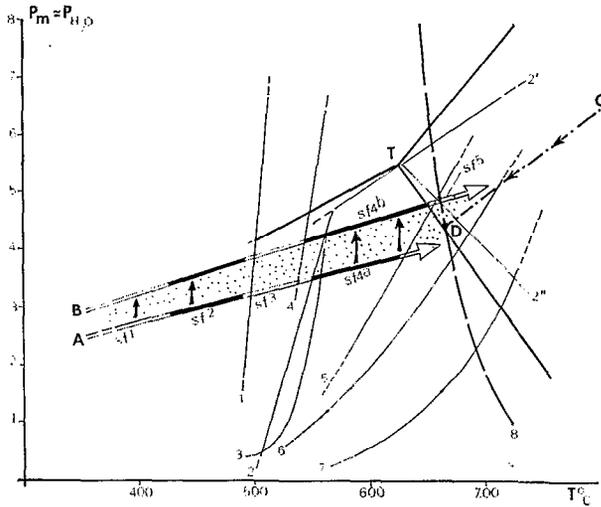


FIG. 10. — Estimations des changements des conditions de T, Pm PH<sub>2</sub>O lors du métamorphisme hercynien progressif du Massif du Zongo-Yani. (1 : pyrophyllite  $\rightleftharpoons$  andalousite (ou disthène) + quartz + H<sub>2</sub>O (ALTHAUS, 1969) ; 2 : Mg-chlorite + muscovite + quartz  $\rightleftharpoons$  cordiérite + biotite + andalousite + H<sub>2</sub>O (HIRSCHBERG et al. 1968) ; 3 : Fe-chlorite + quartz  $\rightleftharpoons$  grenat almandin + H<sub>2</sub>O (Hsu, 1968) ; 3 : chlorite + muscovite  $\rightleftharpoons$  staurotite + biotite + quartz + H<sub>2</sub>O (HOSCHKE, 1969) ; 5 : staurotite + muscovite + quartz  $\rightleftharpoons$  andalousite (ou sillimanite) + biotite + H<sub>2</sub>O (HOSCHKE, 1969) ; 6 : muscovite + quartz  $\rightleftharpoons$  F<sub>(K)</sub> + Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> + H<sub>2</sub>O (EVANS, 1965) ; 7 : muscovite  $\rightleftharpoons$  F<sub>(K)</sub> + corindon + H<sub>2</sub>O (EVANS, 1965) ; T : point triple des polymorphes Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> (RICHARDSON et al., 1969) ; 2' et 2'' : domaine de stabilité des associations « kinzigitiques » à almandin - cordiérite - sillimanite - biotite (HIRSCHBERG et al., 1968) ; 8 : solides du système granitique (TUTTLE et BOWEN, 1958). Les courbes A et B représentent les courbes température-profondeur au début et à la fin de la phase 1 du Zongo-Yani ; la courbe C représente de façon schématique l'ascension adiabatique du magma granitique à deux micas ; ce granite est solide en D.

tendent à démontrer qu'il y a un lien temporo-spatial et peut-être de causalité entre déformation, métamorphisme et intrusion granitique.

Comme cela est illustré par la figure 9, l'ascension du granite à deux micas se serait produite juste au début de la schistogenèse provoquant dans l'encaissant une auréole thermique vouée à cordiérite-andalousite. Lors de la mise en place de ce granite, l'encaissant est soumis à des déformations tectogéniques qui vont en augmentant au cours du temps (fig. 9 B et C) de telle sorte que le granite s'orthogneissifie « à chaud » et que l'encaissant enregistre les effets d'un métamorphisme au gradient géothermique relativement plus bas à la fin qu'au début de la déformation tangentielle (fig. 10).

Cette évolution (hercynienne) des processus tectogéniques, métamorphiques et magmatiques du Zongo est un exemple typique d'une intrusion mésozonale syncinématique. Contrairement à ce qui a été dit dans ce secteur (LJUNGGREN, 1962), il ne s'agit pas d'un massif « métagmatique » qui devait fondre partiellement ou totalement in situ pour donner les granodiorites (andines !) du Huayna Potosi ; les processus deutériques qui accompagnent l'intrusion du granite orthogneissifié à deux micas sont des processus de muscovitisation et de tourmalinisation banaux (cf. GREEN, 1963 - CHINNER, 1966) et fréquents à la périphérie des granites mésozonaux à muscovite-biotite (cf. par exemple les granites à microcline et deux micas hercyniens d'Europe occidentale et leur classique cortège de pegmatites).

BIBLIOGRAPHIE

AHLFELD (F.) et BRANIŠA (L.), 1960. — Geologia de Bolivia. Inst. Bol. del Petr., La Paz (Bolivie).  
 CHINNER (G.A.), 1966. — The distribution of pressure and temperature during Dalradian metamorphism. *Quart. J. Geol. Soc. London*, t. 122 : 159-186.  
 DEER (W.A.), HOWIE (R.A.), ZUSSMAN (J.), 1963. — Rock forming minerals, vol. 1, Longmans, Green and Co Ltd, 333 p., London.  
 GREEN (J.C.), 1963. — High level metamorphism of pelitic rocks in northern New Hampshire. *Am. Min.*, vol. 48 : 991-1023.  
 KOZLOWSKI (R.) et SMULIKOWSKI (K.), 1934. — Les roches éruptives de Bolivie. *Arch. Min.*, 10 : 121-242, Warszawa.  
 LJUNGGREN (P.), 1962. — Los batolitos graníticos y la mineralización en la Cordillera Real, Bolivia. *Petrol. Boliv.*, vol. 4, n° 1, La Paz.  
 MARTINEZ (C.), SUAREZ (R.) et SUBIETA (T.), 1971. — La cadena hercínica en la parte septentrional de los Andes bolivianos (perfil La Paz - Alto Beni). *GEOBOL*, bol. 15, 26-35, 3 pl. h.t., La Paz.  
 MARTINEZ (C.), 1972. — Estructuras hercínicas afectadas por la tectónica andina en la Cordillera Real de Bolivia. *Soc. Geol. Bol.*, n° 18, La Paz.  
 MEGARD (F.), DALMAYRAC (B.), LAUBACHER (G.), MAROCCO (R.), MARTINEZ (C.), PAREDES (P.J.) et TOMASI (P.), 1971. — La chaîne hercynienne au Pérou et en Bolivie. Premiers résultats. *Cah. ORSTOM, sér. Géologie*, vol. III, n° 1, : 5-43, Paris.  
 THOMPSON (J.B.), 1957. — The graphical analyses of mineral assemblages in pelitic schists. *Am. Min.*, vol. 42 : 842-858.