

Le grand chevauchement central himalayen : nouvelles données sur le métamorphisme inverse à la base de la Dalle du Tibet

par Renaud CABY⁽¹⁾, Arnaud PÉCHER⁽²⁾
et Patrick LE FORT⁽³⁾

RÉSUMÉ. — De nouvelles observations faites au Népal Central permettent de préciser les caractères du métamorphisme dans la zone du grand chevauchement central (*Main Central Thrust*, ou M.C.T.). On est amené à séparer trois étapes dans l'évolution métamorphique, les deux dernières étant directement liées au fonctionnement du M.C.T. : 1) un métamorphisme normal, éohimalayen, qui n'existe qu'au-dessus du M.C.T. ; 2) un métamorphisme inverse syn-M.C.T., rétrograde au-dessus du chevauchement dans la Dalle du Tibet et prograde en-dessous, de caractères thermiques variables selon le niveau de troncature de la Dalle ; 3) un métamorphisme rétrograde tardif, peu développé, peut-être associé à une faible reprise à froid du M.C.T.

Mots-clés : Métamorphisme, M.C.T., Himalaya, Népal.

ABSTRACT. — *The Himalayan Main Central Thrust : new data about the reverse metamorphism at the bottom of the Tibetan Slab* : Comparison between previous data on Central Nepal and new ones brings more comprehension about the metamorphism in the Main Central Thrust zone. According to those data, the himalayan metamorphism can be subdivided into several main periods : 1) strong "normal", eohimalayan metamorphism, of barrovian type, only present above the M.C.T., in the Tibetan Slab ; 2) "Reverse" synkinematic metamorphism, reality of which is confirmed. Induced in the previously unmetamorphosed Midland Formations by the over-thrusting of the hot Tibetan Slab, it is a retromorphic process above the M.C.T., and a prograd one under it. According to the level of the basal truncation of the Slab, it can be either a rather low temperature phenomenon (retromorphosis to the green-schist facies of the previous high grade paragenesis of the Slab), or a higher temperature phenomenon. In that case, there is a thermic accordance between old and new paragenesis at the M.C.T. level ; then, the diachronism of the metamorphosis structuration on both sides of the M.C.T. cannot be anymore recognized ; 3) a tenuous second low temperature retromorphosis ends the sequence. It could be related to late movements on the thrust, but their importance is low enough to preserve the previous metamorphism continuity.

Key-words : Metamorphism, M.C.T., Himalaya, Nepal.

Introduction.

Le fameux « métamorphisme inverse » himalayen (superposition des terrains très métamorphiques de la base du Haut Himalaya sur les terrains moins métamorphiques du Moyen Pays Himalayen) a fait l'objet d'études pétrographiques récentes ayant abouti à des modèles géotectoniques variés :

1) la distribution actuelle des paragenèses minérales correspondrait pour l'essentiel à une évolution spatio-temporelle continue du couple contraintes-températures et traduirait les formes transitoires en S que peuvent théoriquement prendre les isothermes lors du fonctionnement d'un cisaillement crustal majeur tel que le M.C.T. (dont la flèche, rappelons-le, dépasse 100 km, l'épaisseur du compartiment chevauchant dépassant souvent 20 km) (W. Frank *et al.*, 1973 ; P. Le Fort, 1974, 1975 ; A. Pécher, 1974, 1978) ;

2) « l'inversion » du métamorphisme ne serait qu'apparente et due à la superposition tardive de séries métamorphiques de haut grade sur des séries moins métamorphiques (S. Hashimoto *et al.*, 1973 ; M.N. Saxena, 1973 ; J. Andrieux *et al.*, 1981 ;

1. R. Caby, Centre de Géologie et Géophysique, U.S.T.L., 34060 Montpellier.

2. A. Pécher, Ecole des Mines, Parc de Saurupt, 54042 Nancy.

3. P. le Fort, C.R.P.G., P.B. 20, 54501 Vandœuvre-lès-Nancy.

Travaux effectués dans le cadre du GRECO n° 130012, « Himalaya-Karakorum ».

M. Brunel et J. Andrieux, 1981) à la faveur de grands chevauchements « froids » accompagnés de rétro-morphoses tardives.

De nouvelles observations dans la zone du M.C.T. au Népal central permettent de préciser les relations entre métamorphisme et fonctionnement du M.C.T., en faisant la part de ce qui correspond aux associations minérales progrades et aux associations minérales rétrogrades syncinématiques. Nous examinerons successivement les associations minérales de la Dalle du Tibet, puis les associations minérales voisines du M.C.T., qui présentent des caractères légèrement différents dans la région du Manaslu et dans la région de la Kali Gandaki, 100 km plus à l'Ouest (fig. 1).

A. Associations minérales de la Dalle du Tibet.

Les séries sédimentaires tibétaines et leur soubassement métamorphique, la Dalle du Tibet (P. Le Fort, 1975), montrent en dehors des zones à leucogranite, un métamorphisme d'intensité régulièrement croissante quand on descend dans l'édifice. L'étude de la cristallinité de l'illite montre que le Trias dans lequel se trouve en général le front supérieur de la schistosité est souvent affecté par un métamorphisme anchizone (Dunoyer de Segonzac, inédit). Dans le Paléozoïque, la schistosité de plan axial des grands plis de couverture du sédimentaire tibétain (qui peuvent être de dimensions plurikilométriques, tels le pli des Annapurnas, et qui remplissent des structures himalayennes antérieures : P. Bordet *et al.* 1981) porte les principaux minéraux de métamorphisme. D'abord apparaissent la chlorite et le mica blanc, parfois accompagnés de chloritoïde dans les roches de composition adéquate et d'épidote dans les roches carbonatées, puis la biotite. Ensuite vient le grenat, puis le pyroxène \pm scapolite et l'amphibole dans les roches carbonatées qui forment la majorité du Paléozoïque inférieur.

A partir de ce niveau, les roches sont beaucoup plus déformées, par suite d'un intense laminage à chaud. La schistosité métamorphique se transforme en foliation, souvent mimétique du rubanement sédimentaire intensément aplati et boudiné à toutes échelles (« gneiss et quartzites en plaquettes », formant le sommet de la Dalle du Tibet). En continuant à descendre dans l'édifice, la sillimanite apparaît généralement dans les paragneiss situés au toit d'intercalations de gneiss ceillés de la formation III (gneiss à mégacristsaux de feldspath potassique, qui ont été datés à 517 m.a. : P. Le Fort *et al.*, 1982). Elle devient très abondante plus bas, dans la partie sommitale de la Formation I, série silico-alumineuse épaisse (environ 8 km dans la région de Manaslu) et monotone. Elle est souvent associée à de la muscovite en voie de déstabilisation et

parfois à du disthène : la sillimanite semble alors toujours postérieure au disthène, qu'elle peut englober; elle apparaît aussi en placages dans des fentes de tension et dans des petits cisaillements, souvent inverses, faiblement inclinés au Nord; ces cisaillements sont tardifs, puisque surimposés même aux pegmatites à muscovite sécantes sur la foliation déjà replissée.

Dans cette partie supérieure de la Dalle du Tibet, l'existence de températures très élevées, dépassant sans doute 700 °C (A. Pécher, 1978) est marquée par la déstabilisation de la muscovite en feldspath potassique, et par l'importance de l'anatexie qui affecte tant les métapélites que les intercalations métasédimentaires calco-magnésiennes : migmatites à amphibole et/ou clinopyroxène, agmatites à ciment dioritique, veines et corps d'alaskites. L'existence des fentes tardives à sillimanite souligne la pérennité de ces hautes températures jusqu'à la fin de la déformation majeure.

Plus bas encore, dans toute la partie inférieure de la formation I, il n'y a pas de sillimanite, mais le disthène est extrêmement fréquent, aussi bien dans les gneiss que dans les mobilisats quartzo-feldspathiques. L'association minérale alors observée est du type kinzigite : quartz + biotite + plagioclase + grenat + graphite + disthène + rutile + zoïsite \pm feldspath potassique (la muscovite étant rare et le feldspath potassique beaucoup plus abondant dans la partie supérieure de la Formation I). A ces gneiss de type kinzigite, sont associées des lentilles leucocrates de gneiss khondalites rubanés, témoins possibles d'une mobilisation précoce dans l'histoire tectono-métamorphique. Tous les minéraux sont extrêmement frais, souvent peu orientés, de grande taille (en particulier microstructures « en croissance exagérée » du quartz, J.L. Bouchez et A. Pécher, 1976 et 1981), témoignant d'un important recuit postcinématique à haute température.

Les paragenèses observées dans la Dalle du Tibet témoignent donc d'un métamorphisme de type barrovien classique, suivi de conditions de plus haute température et/ou basse pression :

— Les associations minérales observées à la base de la Dalle (limite des zones à biotite-staurotède-disthène et biotite-disthène, associations à disthène-plagioclase-zoïsite) impliqueraient une pression totale de l'ordre de 8 kb pour une température de l'ordre de 650 °C (A. Pécher, 1978). Il s'agit de conditions pression-température mésocristales proches de la transition au faciès des granulites de haute pression (telles qu'on peut les admettre d'après les données expérimentales de la littérature récente, et en bon accord avec l'épaisseur totale de la Dalle du Tibet, de l'ordre de 20 à 25 km (P. Le Fort, 1975)).

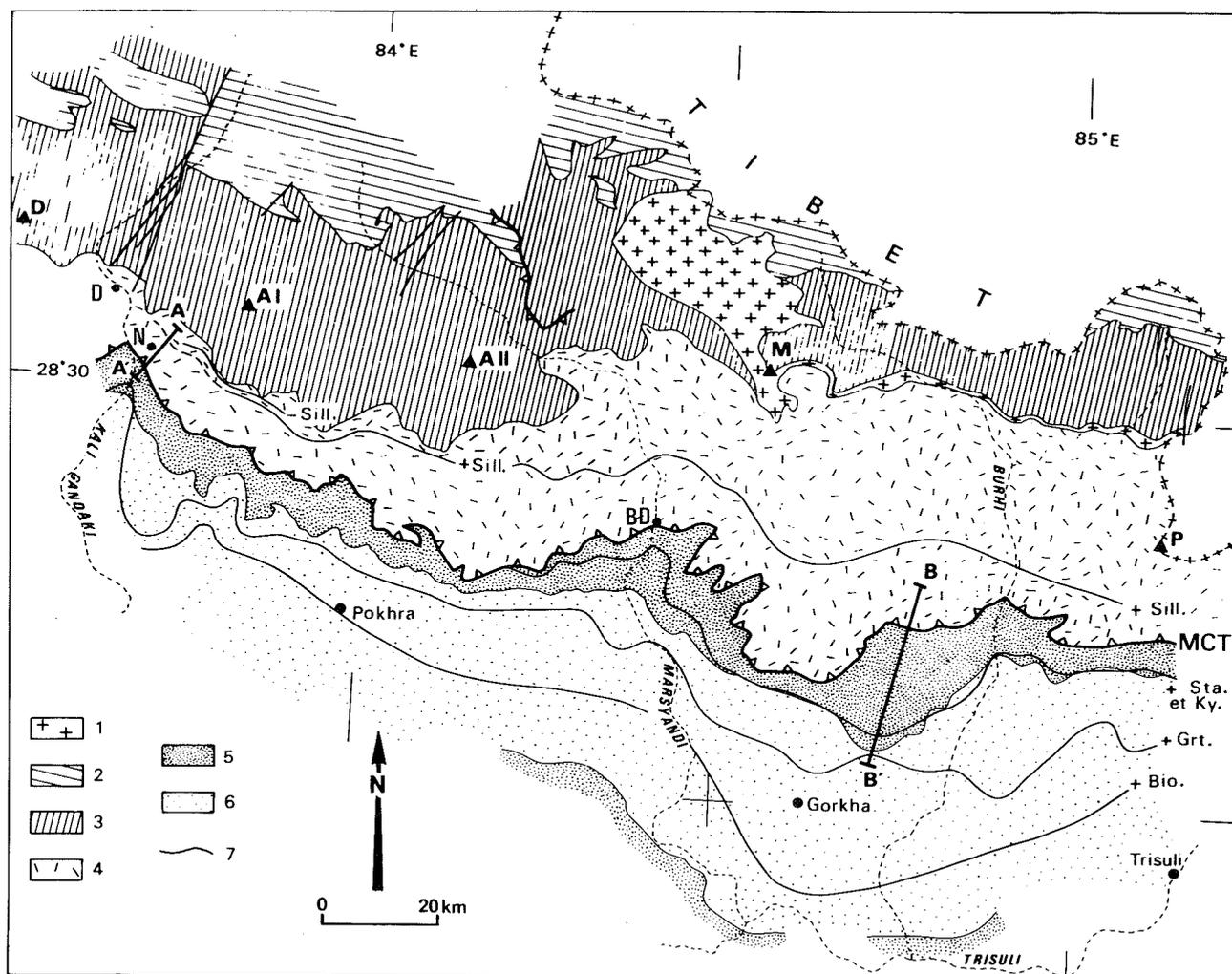


FIG. 1. - Schéma structural et localisation des coupes étudiées.

1 : granite du Manaslu; 2 et 3 : sédimentaire tibétain, Mésozoïque (2) et Paléozoïque (3); 4 : Dalle du Tibet; 5 et 6 : Moyen Pays, Formation Supérieure (5) et Formation Inférieure (6); 7 : isogrades du métamorphisme liés au fonctionnement du M.C.T. (Bi : biotite, Grt : grenat, Ky : disthène, Sill : sillimanite, Sta : staurotite). Toponymie : AI, AII : Annapurna I (8 091 m), Annapurna II (7 937 m); D : Dhaulagiri (8 167 m); M : Manaslu (8 125 m); P : Pabil (7 406 m); B.D. : Bahun Dara; D : Dana; N-Narcheng.

- Mais bien des équilibres minéralogiques présents vers le haut de la Dalle sont tardicinématiques (en particulier ceux à sillimanite), probablement pénécotemporains du recuit généralisé dans toute la Dalle. Ils n'appartiendraient pas à la suite barroviennne précoce mais correspondraient à une évolution tardive du gradient vers un type « haute température ».

FIG. 1. - Structural sketch map and localization of the cross-sections.

1 : Manaslu granite; 2 and 3 : Tibetan Sedimentary Series, Mesozoic (2) and Paleozoic (3); 4 : Tibetan Slab; 5 and 6 : Higher (5) and lower (6) Midlands Formations; 7 : metamorphic isogrades (Bi : biotite; Grt : garnet; Ky : kyanite; Sill : sillimanite; Sta : staurolite).

B. Les associations minérales de la zone du M.C.T.

Le Grand Chevauchement Central correspond à la limite entre les formations du Moyen Pays et de la Dalle du Tibet. A l'échelle cartographique, ce chevauc-

chement est en général facilement localisé, à la limite de deux formations lithologiquement très dissemblables : l'épaisse et monotone Formation I de la Dalle du Tibet, d'aspect très métamorphique s'oppose nettement à la série métasédimentaire beaucoup plus diversifiée et riche en niveaux carbonatés du Moyen Pays.

Cependant sur le terrain le chevauchement est plus ou moins difficile à localiser et on peut distinguer de ce point de vue deux domaines :

– *Un domaine occidental*, où la limite entre le Moyen-Pays et la Dalle du Tibet est brutale, et soulignée localement (en Kali Gandaki par exemple) par des niveaux plus schisteux, souvent chloriteux, parfois riches en lentilles de quartz d'exsudation (toutefois ces lentilles, qui marquent des zones préférentielles de circulation des fluides, sont abondantes partout dans tous les niveaux schisteux de la série).

– *Un domaine oriental* (Manaslu), où cette limite peut être très difficile à fixer exactement car il y a apparemment continuité et accordance totale tant métamorphique que structurale entre la Dalle du Tibet et les Formations du Moyen-Pays (A. Pécher, 1978).

Les observations en lame mince montrent que ces deux aspects différents du M.C.T. d'un domaine à l'autre correspondent en fait à deux régimes métamorphiques légèrement différents.

1. Le métamorphisme dans la zone du M.C.T. à l'Ouest des Annapurnas.

a) *Les associations minérales rétrogrades de la base de la Dalle du Tibet.* Ces dernières n'ont été observées qu'à la base de la Dalle, dans la zone du M.C.T. (fig. 2, coupe A, éch. 1 à 5, et fig. 3). Elles correspondent macroscopiquement à des schistes très micacés ou « cupuleux » affleurant en général très mal, ou bien à des dalles de schistes micacés plus compacts.

Examinées en détail par l'un d'entre nous (R.C.) en rive gauche de la Kali Gandaki, aux environs de Narcheng, ces roches qui forment transition avec les gneiss à disthène qui les surmontent, affleurent sur 150 m d'épaisseur au plus. Ce sont des phyllonites rétromorphiques à matrice finement micacée (mica blanc et biotite brun pâle secondaires); les cupules micacées sont des clastes tordus de muscovite, en yeux flexueux, à clivage transverse sur la néofoliation, et le plus souvent en partie remplacés par des amas polycristallins de mica blanc de petite taille (fig. 3-1); le disthène, parfois tronçonné, subsiste en reliques blindées au sein d'un mica blanc secondaire (fig. 3-2); les gros grenats centimétriques sont allongés et fracturés, à ombres de biotite microcristalline (fig. 3-3), ou

même totalement éclatés et remplacés par de la biotite verte, puis de la chlorite (fig. 3-4 et 3-5); le rutile est plus ou moins complètement pseudomorphosé en sphène ou en ilménite; le plagioclase à habitus fusiforme est fortement séricitisé.

Il s'agit donc d'une rétromorphose dynamique à relativement haute température (mica blanc, biotite et grenat stables; $T = \text{env. } 500 \text{ } ^\circ\text{C}$). Cependant, la présence de chlorite pouvant remplacer la biotite et le grenat, de produits finement micacés pseudomorphosant le disthène, et de calcite libre, indiquent que de nouvelles conditions de plus basse température du faciès des schistes verts de bas degré, définissant une seconde rétromorphose, se sont superposées à la première rétromorphose.

Nous avons rencontré des signes identiques d'une rétromorphose de basse température dans des mica-schistes cupuleux et des quartzites bien au-dessus du M.C.T. Ainsi, en amont de Dana, près de 2 km au-dessus du M.C.T., l'ancienne foliation a rejoué en plan de glissement, avec néoformation de chlorite; ces rejeux qui correspondent à un cisaillement froid tardif à l'intérieur de la Dalle (fig. 2), s'accompagnent d'une nouvelle schistosité de « strain-slip » soit fortement pentée au Nord, soit faiblement pentée au Sud.

b) *Les associations minérales progrades du Moyen Pays.* Au-dessous du M.C.T.; dans la partie sommitale des Formations du Moyen Pays, on ne retrouve pas les critères pétrographiques témoignant de l'évolution rétrograde complexe décrite ci-dessus (fig. 2, fig. 3-6 et 3-7). Sur une centaine de mètres ou plus apparaissent des micaschistes verdâtres d'aspect macroscopique peu différent des roches rétromorphiques qui les surmontent. Pourtant, l'assemblage à 2 micas + grenat \pm plagioclase \pm rutile \pm épidote est indemne de rétromorphose : le grenat syncinématique (almandin pauvre en pyrope) à inclusions de quartz (fig. 3-7) a des queues de cristallisation de biotite (fig. 3-6), et de nombreuses lamelles de mica blanc et biotite sont surimposées à l'assemblage synschisteux. A la différence des roches situées dans la Dalle du Tibet, tous les minéraux, y compris le quartz, sont chargés de fines inclusions de matière organique diffuse, dont le regroupement en lamelles de graphite n'est qu'ébauché.

Progressivement semble-t-il, mais avec des récurrences, ces micaschistes passent vers le bas à des phyllades noirs, affectés par un microplissotement postschisteux généralisé. En lame mince, la structure est toujours celle d'un mica-schiste à grain fin, dans lequel la matière organique est encore préservée en rubans microscopiques inclus notamment dans les fines lamelles, en général polycristallines, de phyllites non rétromorphiques (mica blanc, biotite brune ou chlo-

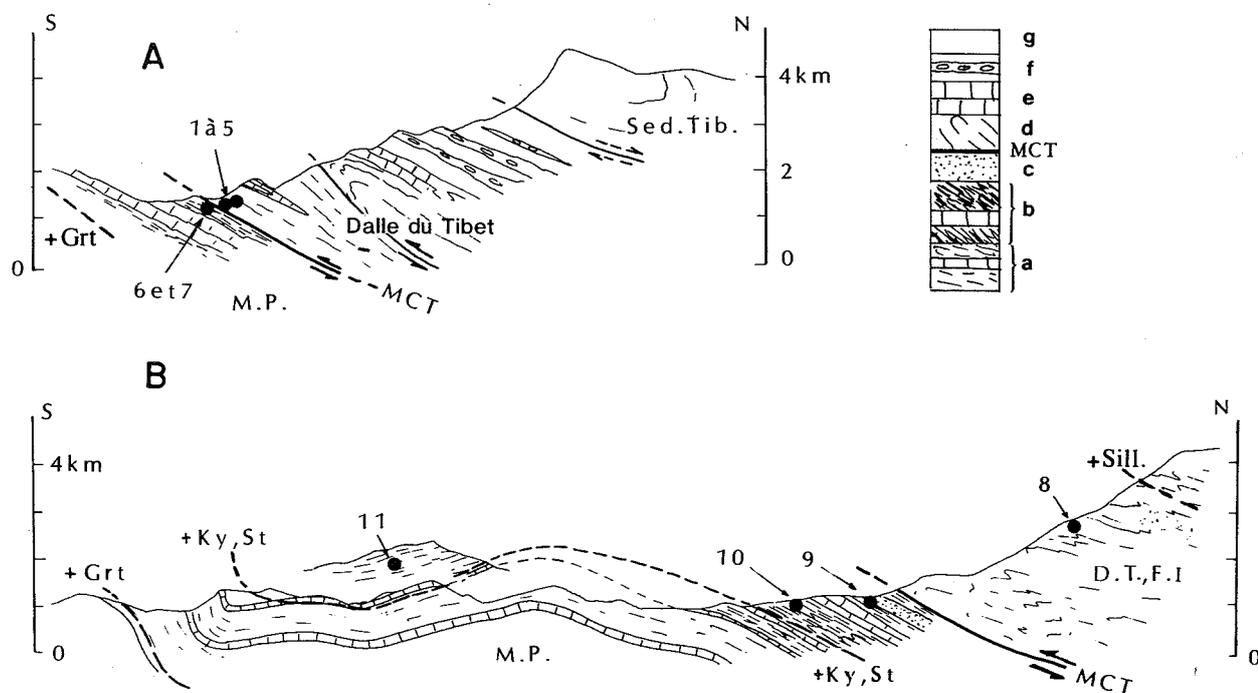


FIG. 2. - A: Coupe du domaine occidental; B: Coupe du domaine oriental (cf. fig. 1).

Les numéros renvoient aux échantillons des figures 3 et 4. Lithostratigraphie: Moyen Pays (M.P.) - a: schistes graphiteux et calcaires - b: schistes graphiteux et dolomites - c: quartzites; Dalle du Tibet (D.T.) - d: gneiss à disthène (Formation I) - e: gneiss à minéraux calciques (Formation II) - f: gneiss ocellés (Formation III) - g: sédimentaire tibétain. Isogrades métamorphiques: mêmes abréviations que fig. 1.

FIG. 2. - A: cross-section in the occidental domain; B: cross-section in the oriental domain.

Numbers refer to samples of the figures 3 and 4. Lithostratigraphy: Midlans formations (M.P.) - a: shists and limestones - b: carbonaceous shists and dolomites - c: quartzites. Tibetan Salb (D.T.) - d: kyanite rich gneisses (Formation I) - e: calcareous gneisses (Formation II) - f: augen gneisses (Formation III) - g: tibetan sediment.

rite) à plat dans la schistosité primaire. Le grenat, riche en inclusions hélicitiques de quartz, est syncinématique et présente des bordures réactionnelles nettes avec le mica blanc et la biotite brun pâle. En lame mince, la schistosité apparaît marquée par un enchevêtrement planaire complexe et plissé de micas, parfois scellé par des micas optiquement identiques mais de plus grande taille. Le plagioclase fusiforme, pouvant avoisiner avec la calcite, est de l'albite. Les autres minéraux, à habitus d'aiguille de taille demi-millimétrique, sont de l'épidote à cœur de zoïsite, du rutile, et du chloritoïde tronçonné. Au sein de ces phyllades noirs, on note aux épontes des loupes de quartz une augmentation brutale du grain, avec blastèse de biotite brune en équilibre avec la chlorite, le grenat et la calcite. Peut-être favorisée par l'abondance locale des fluides, une telle blastèse tardive à gros grain traduirait bien l'évolution prograde du métamorphisme (transformation prograde inachevée du faciès des schistes verts affectant pour la première fois un sédiment).

Plus bas encore, l'aspect sédimentaire des roches

est de mieux en mieux conservé: on retrouve des « mud-cracks » moyennement déformés et des chenaux microconglomératiques dans les quartzites micacés du « Moyen Pays Inférieur », 2 à 3 km structurellement sous le M.C.T., et 10 à 20 km au Sud de sa trace cartographique.

Dans ce domaine occidental, les associations minérales observées impliquent donc une discontinuité structurale et métamorphique majeure de part et d'autre du M.C.T.

2. Le métamorphisme dans la zone du M.C.T. à l'Est des Annapurnas.

Dans toute la partie orientale du secteur considéré (A. Pécher, 1978), les critères microscopiques usuels ne permettent pas de déceler une évolution pluriphasée ou rétrograde à la base de la Dalle du Tibet; ceci nous conduit à admettre qu'il y a une continuité tant microstructurale que métamorphique de part et d'autre du M.C.T. (A. Pécher, 1978).

Au-dessus du M.C.T., on retrouve dans la Formation I les paragenèses de type kinzigite décrites précédemment mais complétées près de la base de la Dalle par de la staurotide associée au grenat et au disthène.

En-dessous du M.C.T., on ne retrouve jamais les mobilisats leucocrates qui existent dans la Formation I. Par contre, les micaschistes du Moyen Pays montrent encore près du M.C.T. des associations minéralogiques semblables à celles de la Dalle : quartz \pm plagioclase + muscovite + biotite + grenat + disthène \pm staurotide \pm graphite \pm rutile \pm zoisite. Les minéraux, de grosse taille, sont là aussi très frais, et le recuit tardif est ici encore très important : textures « en croissance exagérée » du quartz (J.L. Bouchez et A. Pécher, 1981), parfois aussi croissance exagérée de la biotite (fig. 4-9) qui englobe alors de nombreuses lamelles de graphite, ou même des cristaux de disthène.

Dans ces schistes du Moyen Pays situés près du M.C.T., la staurotide, et plus encore le grenat, sont en général nettement syncinématiques (fig. 4-10); mais leur blastèse se poursuit fréquemment jusqu'après la fin de la structuration métamorphique principale, tout en restant toujours antérieure aux plis tardifs qui remplissent la schistosité métamorphique (plis P 3). Par contre, la biotite brune peut cristalliser près du M.C.T. jusqu'après la formation de ces plis tardifs; on

peut en effet observer localement la polygonisation des grosses biotites précoces tordues dans ces plis, ou des néocristallisations en plan axial des mêmes plis (fig. 4-11).

En descendant dans les formations du Moyen Pays, le recuit diminue beaucoup. Les structures sédimentaires deviennent nettement reconnaissables, et l'on passe progressivement à des métasédiments à grain fin, d'abord à biotite-grenat \pm staurotide \pm disthène (jusqu'à environ 3 km en-dessous du M.C.T.), puis à biotite-grenat, et enfin à biotite-chlorite loin du M.C.T.

Exception faite d'une légère rétro-morphose tardive à chlorite (post P 3) toujours très locale (équivalent de la seconde rétro-morphose décrite en Kali Gandaki), les associations minérales observées sous le M.C.T. dans ce domaine oriental sont toujours progrades. Elles correspondent à un métamorphisme progressif de plus en plus intense lorsqu'on se rapproche du M.C.T. en remontant dans les structures (*métamorphisme inverse*); et au niveau du M.C.T., le degré de métamorphisme atteint dans le Moyen Pays est apparemment le même que celui de la partie inférieure de la Dalle du Tibet (identité des paragenèses métamorphiques). Il y a donc eu ici accordance thermique (sinon barométrique?) de part et d'autre du M.C.T., à une température que l'on peut estimer à environ 630 °C (limite supérieure de la zone à staurotide, A. Pécher, 1978).

FIG. 3. — Evolution métamorphique à proximité du M.C.T., dans le domaine occidental (Kali Gandaki). Micrographies de lames minces.

Echelles graphiques : 0,5 mn. Minéraux : Bi : biotite; Chl. : chlorite; Gr : grenat; il : ilménite; Mu : muscovite; Pl : plagioclase; Q : quartz; Ru : rutile - 1 à 5 : associations rétrogrades de la Dalle du Tibet, en descendant vers le M.C.T. 1 : (Ech. 78485) claste tordu de muscovite conservé dans un assemblage équi-granulaire secondaire à biotite - mica blanc - 2 : (Ech. 78479) disthène tronçonné blindé dans un mica blanc secondaire - 3 : (Ech. 78402) grenat craquelé, partiellement détruit et corrodé par de la biotite microcristalline - 3' : (Ech. 78402) craquelures du grenat soulignées par de la chlorite - 4 : (Ech. 78405) très près du M.C.T., grenat presque entièrement transformé en biotite microcristalline - 5 : (Ech. 78482) grenat totalement chloritisé (rétromorphose 1 + 2). Noter le grain de rutile partiellement transformé en oxydes à sa périphérie.

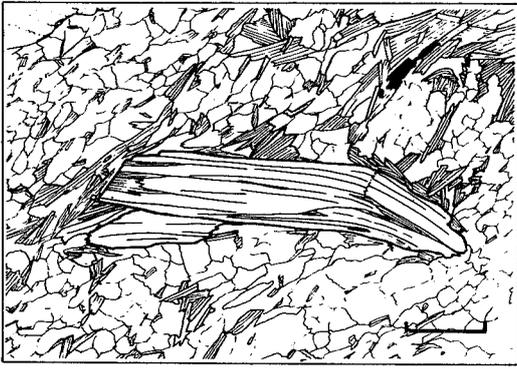
6 et 7 : associations progrades du Moyen Pays, sous le M.C.T. - 6 : (Ech. 78486) grenat à queues de biotite réactionnelle dans une matrice surtout constituée de mica blanc - 7 : (Ech. 78403) grenat hélicitique syncinématique (syn-S₂, schistosité associée au fonctionnement du M.C.T.), dans une matrice finement micacée à inclusions charbonneuses.

FIG. 3. — *Metamorphic evolution near the M.C.T. along the occidental cross-section. Thin sections drawings.*

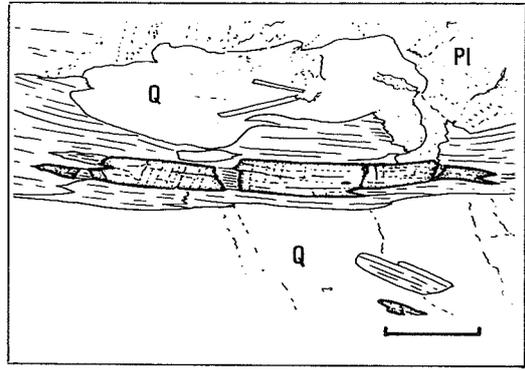
Scale bar : 0.5 mm. 1 to 5 : retrograd associations in the Tibetan Slab

1 : Old kinked muscovite in a mosaic of new biotites and white micas - 2 : Stretched kyanite preserved in a white mica - 3 : Garnet partly destroyed and corroded by microcrystalline biotite - 3' : Cracks in a garnet underlined by chlorite crystallizations - 4 : Very near the M.C.T., garnet almost transformed in finely grained biotite - 5 : Chloritized garnet.

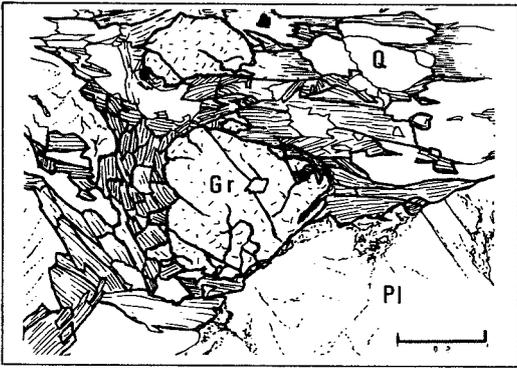
Notice the oxydes at the boundaries of an old rutile grain. 6 and 7 : prograd associations in the Midland zone, under the M.C.T. - 6 : Garnet with reactional biotite trails, in a matrix mainly of white micas - 7 : Syncinematic helicitic garnet in a fine-grained micaceous matrix with carbonaceous impurities.



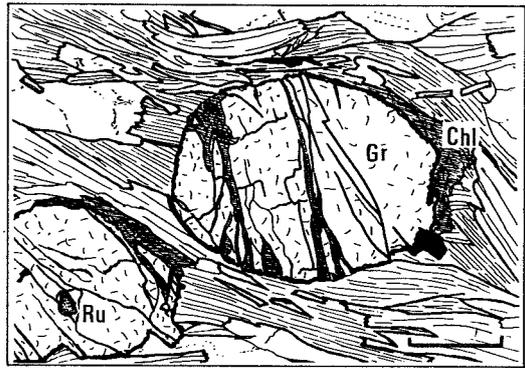
1



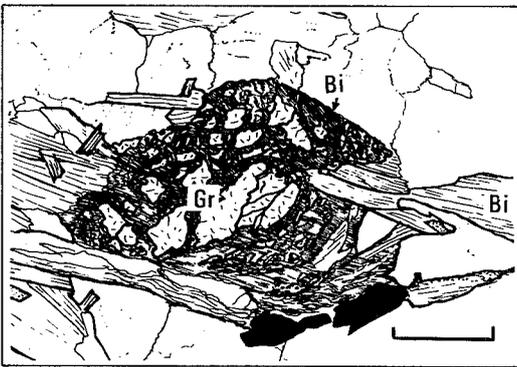
2



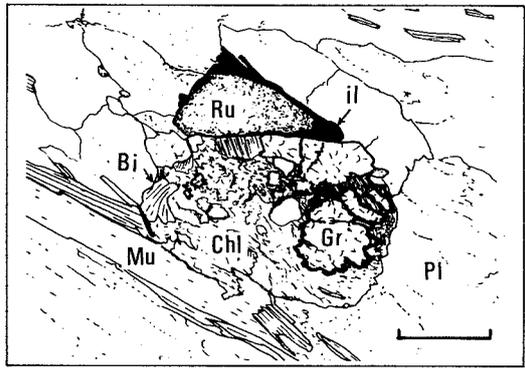
3



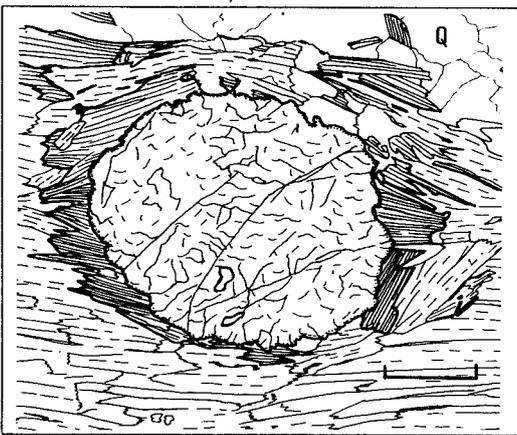
3'



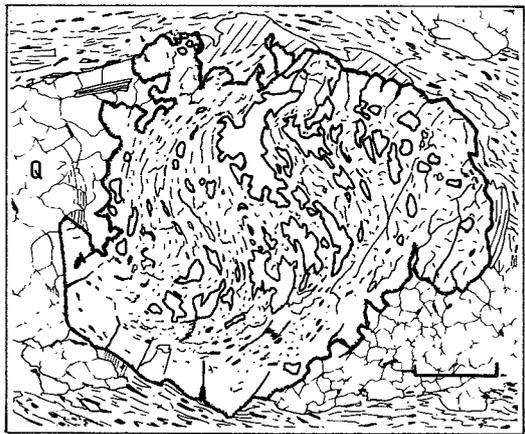
4



5



6



7

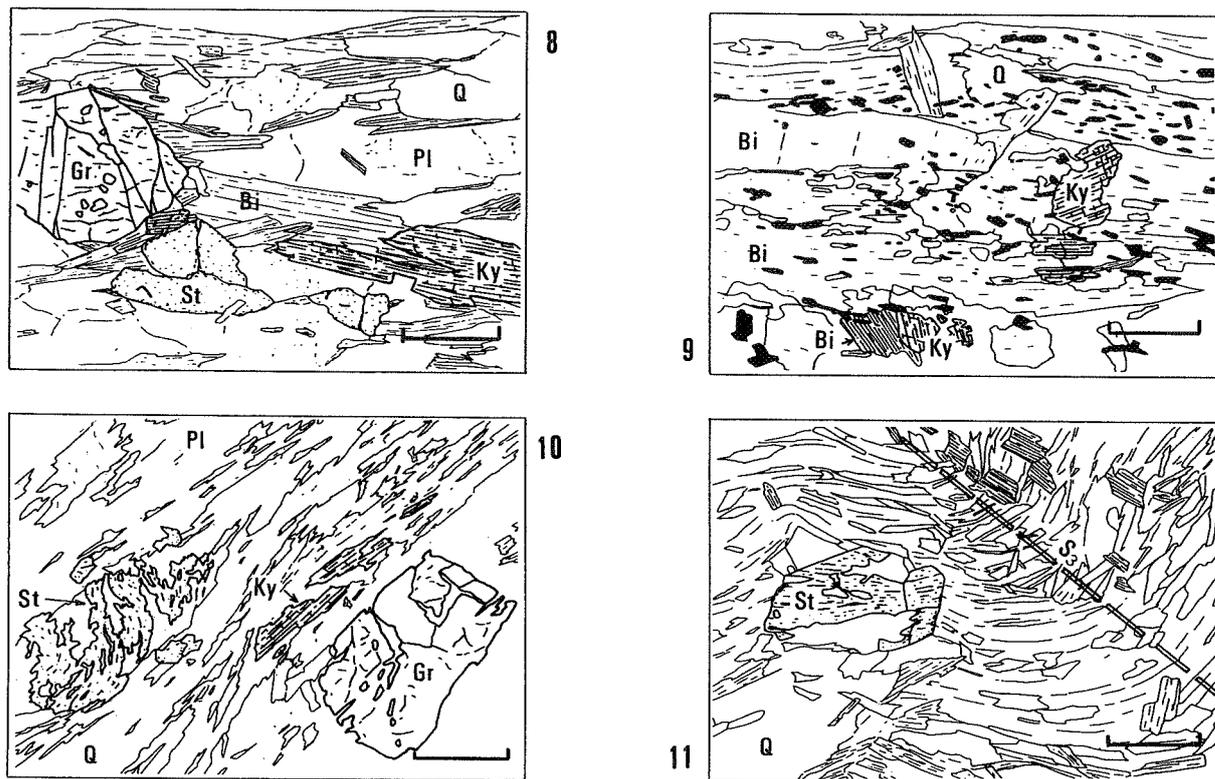


FIG. 4. - Evolution métamorphique dans le domaine oriental (cf. coupe B, fig. 1 et 2). Micrographies de lames minces. Echelles graphiques : 0,5 mm; Minéraux : Bi : biotite - Gr : grenat - Ky : disthène - Pl : plagioclase - Q : quartz - St : staurolite.

8 : (Ech. 74258) 2,5 km au-dessus du M.C.T., limite supérieure de la zone à staurolite, gneiss à quartz, oligoclase, biotite, staurolite, disthène - 9 : (Ech. 74247) 0,5 km en-dessous du M.C.T., schistes à biotite, graphite, disthène; recuit important de la biotite, en grandes lattes pocillitiques - 10 : (Ech. 74699) 1,5 km en-dessous du M.C.T., micaschiste à biotite, grenat, disthène, staurolite; noter la schistosité interne sigmoïde de la staurolite syncinématique (staurolite syn-S₂, schistosité associée au fonctionnement du M.C.T.) - 11 : (Ech. 74346) env. 2 km en-dessous du M.C.T., schiste à staurolite, biotite; recuit peu accentué; développement postcinématique de la staurolite et biotite de seconde génération soulignant la schistosité S₃.

C. Discussion.

Les autres coupes étudiées au Népal Central montrent que le passage du domaine oriental au domaine occidental se fait par évolution progressive des caractères tectonométamorphiques (A. Pécher, 1978). Les deux coupes présentées ici correspondent aux cas extrêmes rencontrés dans ce segment de la chaîne; différentes mais complémentaires, elles éclaireront le problème de l'hétérochronisme de la structuration métamorphique et celui des conditions de pression

FIG. 4. - Metamorphic evolution along the oriental cross-section. Thin sections drawings.

Scale bar : 0.5 mm.

8 : 2.5 km above the M.C.T., higher limit of the staurolite zone, quartz, oligoclase, staurolite, kyanite gneiss - 9 : 0.5 km above the M.C.T., late recrystallization of biotite in a biotite graphit, kyanite schist - 10 : 1.5 km under the M.C.T. biotite, garnet, staurolite, kyanite schist; syncinematic staurolite displaying an internal sigmoidal schistosity - 11 : 2 km under the M.C.T. staurolite, biotite schist. Only slight recrystallization, but post-cinematic growths of staurolite and new biotites in the S₃ direction.

et de température de part et d'autre du chevauchement.

1. Hétérochronisme du métamorphisme et de la schistogenèse de part et d'autre du M.C.T.

La coupe à l'Ouest des Annapurnas (Kali Gandaki) montre une discontinuité majeure, non seulement lithologique mais aussi métamorphique, à la base de la Dalle du Tibet. Les conditions haute pression - haute température, puis haute température (recuit) caracté-

ristiques de la Dalle, ne se retrouvent pas sous le M.C.T. Par contre, au métamorphisme rétrograde syncinématique à biotite-chlorite-grenat de la base de la Dalle (1^{ère} rétro-morphose) correspond le métamorphisme prograde, syncinématique, présentant les mêmes associations minérales, du sommet du Moyen Pays. Ces associations trouvées de part et d'autre du M.C.T. et étroitement liées au contact Dalle du Tibet - Moyen Pays, sont celles qui résultent ici du fonctionnement du chevauchement. Elles sont plus jeunes que le recuit « tardif » de haute température visible dans toute la Dalle. Il y a donc nécessairement hétérochronisme entre le métamorphisme inverse, ici peu accentué, « inachevé » du Moyen Pays et le métamorphisme barrovien principal de la Dalle.

Malgré l'accordance tectonique des domaines sus et sous-jacents, on ne peut corrélérer dans cette coupe du domaine occidental la schistogenèse principale de part et d'autre du M.C.T. La schistosité liée au fonctionnement du M.C.T. est soulignée dans le Moyen Pays par les minéraux du métamorphisme prograde syncinématique à biotite-chlorite-grenat : la déformation cisailante majeure syn-M.C.T., est synchrone de la rétro-morphose 1 visible au-dessus du M.C.T. ; elle est donc plus jeune que la structuration majeure des parties profondes de la Dalle, réalisée antérieurement au recuit haute-température. On peut d'ailleurs observer dans la Dalle des plis précoces, antérieurs à la foliation à biotite-disthène.

La seconde rétro-morphose, à chlorite seule, a son intensité maximale au niveau du M.C.T. lui-même. Elle semble bien marquer des rejeux tardifs « froids » du chevauchement, dont on ne peut ici démontrer clairement l'importance.

2. Variabilité des conditions thermiques d'un point à l'autre lors du fonctionnement du M.C.T.

Contrairement à ce que l'on voit à l'Ouest, nous n'avons pas retrouvé à l'Est des Annapurnas de preuves minéralogiques ou structurales de la première rétro-morphose, et il n'y a que des signes extrêmement ténus de la seconde rétro-morphose à chlorite (notamment petits cisaillements inverses garnis de chlorite). L'examen des associations minérales ne permet pas de déceler de discontinuité de la suite métamorphique depuis la Dalle du Tibet jusqu'au Moyen Pays, bien que l'on puisse toujours envisager que les associations minérales de la Dalle aient été ici aussi partiellement achevées au moment du mouvement majeur le long du M.C.T.

Mais le métamorphisme prograde et syncinématique du Moyen Pays a atteint, à proximité du M.C.T., des

conditions voisines de celles de la Dalle du Tibet (la sillimanite n'apparaît cependant jamais, et aucun phénomène de mobilisation n'a été observé). Ces conditions ont été réalisées pendant et même avant (fig. 4) le recuit de haute température, qui ici descend largement en-dessous du M.C.T., dans la partie supérieure des schistes à staurotide-disthène sous-jacents.

Les conditions d'affleurement ne permettent pas d'exclure la présence de minces bandes de phyllonites, analogues à la bande qui semble exister en Marsyandi, au niveau du village de Bahun Dara. Il n'en reste pas moins que le fonctionnement du M.C.T. s'est fait dans ce domaine oriental essentiellement à haute température.

Dans les deux coupes étudiées, la distribution des isogrades sous le M.C.T. (*métamorphisme inverse*) implique des régimes thermiques semblables, où l'apport de chaleur se fait du haut vers le bas : le métamorphisme inverse s'explique par la haute température initiale du domaine chevauchant, reflet probable de conditions initiales particulières du couple lithosphère-asthénosphère (cf. A. Pécher, 1978, et P. Bird, 1978).

Mais il y a *évolution graduelle* d'Ouest en Est vers des conditions de plus en plus chaudes, le développement du métamorphisme inverse par effet de « fer à repasser » devenant de plus en plus important. On retrouve là l'évolution déjà mise en évidence par l'étude des microstructures du quartz (J.L. Bouchez et A. Pécher, 1981). Nous pouvons relier cette évolution qui s'accompagne d'une augmentation d'épaisseur importante de la zone à disthène, tant au-dessus du M.C.T. (de 2 à 8 km) qu'au-dessous (nulle en Kali Gandaki, à près de 3 km en Burhi Gandaki) à l'augmentation concomitante d'épaisseur de la Dalle du Tibet (de 3,5 à 10 km environ). Les différentes conditions de fonctionnement du M.C.T. traduiraient des différences de niveau de troncature de la Dalle à sa base : le M.C.T. serait d'autant plus chaud que la troncature serait plus profonde, la température initiale dans la zone de cisaillement étant alors plus élevée, et la quantité de chaleur disponible dans le compartiment chevauchant étant plus importante.

3. Absence de hautes pressions sous le M.C.T.

Les conditions maximales de pression, de l'ordre de 8 kb, sont enregistrées dans les paragenèses précoces, anté-recuit, de la base de la Dalle du Tibet. Elles sont en bon accord avec l'estimation de l'épaisseur de la pile stratigraphique et avec la géométrie d'ensemble du domaine tibétain chevauchant.

Par contre, on ne retrouve pas sous le M.C.T. d'indices de telles conditions. Il est vrai que l'on

manque de bons marqueurs barométriques dans les domaines de température considérés. Néanmoins, il n'apparaît nulle part au sein des schistes du Moyen Pays, dans la zone laminée et recristallisée pendant le fonctionnement du M.C.T., des associations marquant les très hautes pressions, de l'ordre de 8 à 10 kb, que semble impliquer la géométrie d'ensemble. En particulier, les roches metabasiques situées sous le M.C.T., qui devraient être des schistes à glaucophane ou des éclogites, sont en réalité des amphibolites à actinote + albite + clinzoïsite + biotite et à structure magmatique fréquemment conservée (J.L. Lasserre, 1977), où le grenat et le chloritoïde sont localement signalés (*ibid.*, 1977) mais qui sont dépourvues de rutile.

Par ailleurs, les mesures microthermométriques sur les inclusions fluides du quartz des loupes d'exsudation tardi-métamorphiques du Moyen Pays (A. Pécher, 1979) (loupes à quartz-disthène dans le sommet du Moyen Pays, près du M.C.T., puis plus bas et plus au

Sud, loupes à quartz-biotite-grenat, puis quartz-chlorite), aboutissent toutes à des valeurs étonnamment basses de la densité des fluides inclus. La combinaison de ces densités et des températures fixées par les minéraux associés au quartz donnent des pressions de l'ordre de 3 à 4 kb sous le M.C.T., nettement inférieures aux pressions attendues. On sait que les inclusions se rééquilibrent facilement vers les faibles densités (J. Leroy, 1979, A. Pécher, 1981), et les valeurs ci-dessus ne sont pas forcément représentatives du pic de la pression lors de la cristallo-génèse. Mais qu'il s'agisse des densités primaires ou qu'il y ait eu un rééquilibrage tardif, ces densités impliquent une évolution tectonométamorphique où la décroissance de la pression a été très forte par rapport à la décroissance de la température.

Ainsi, tant les paragenèses minérales que les données sur les inclusions fluides indiquent que le métamorphisme syn-M.C.T., affectant de manière

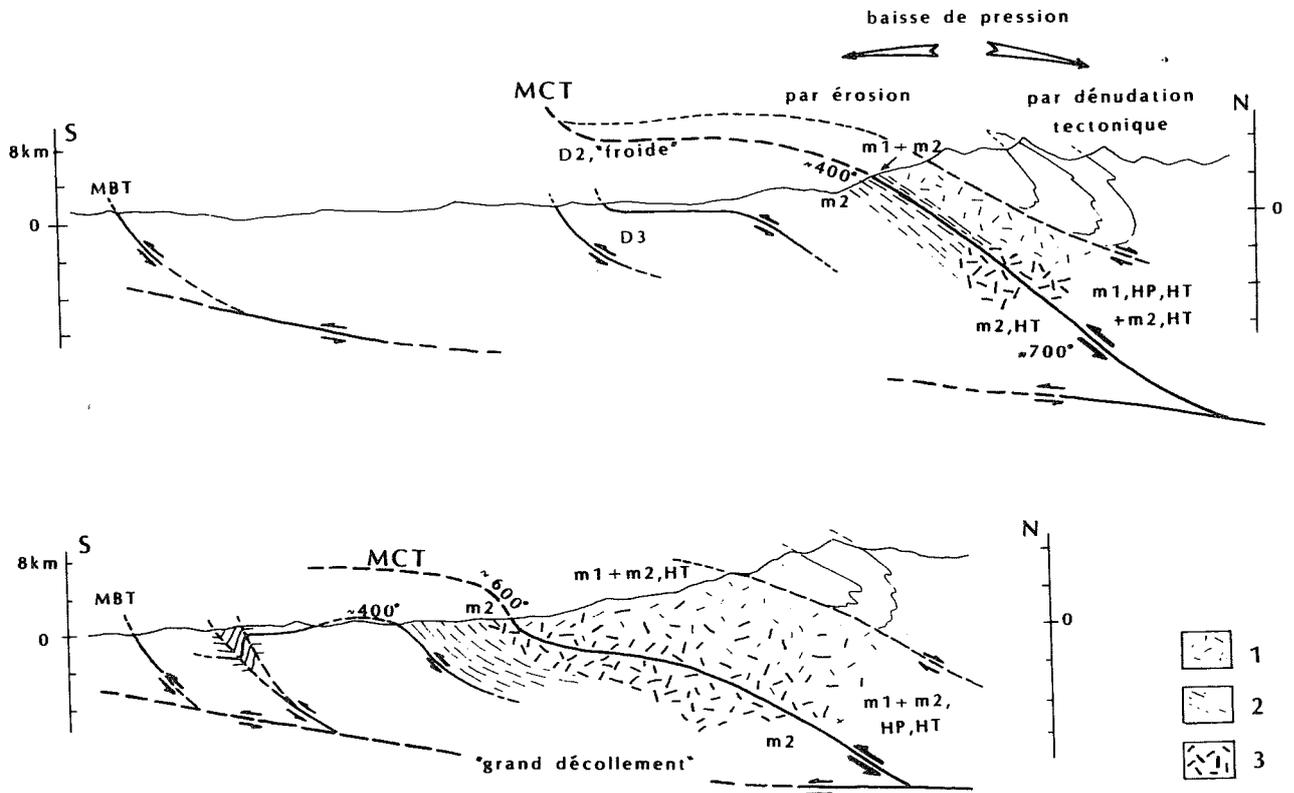


FIG. 5. - Coupes semi-schématiques à l'échelle de la croûte des deux domaines considérés ici : coupe au niveau des Annapurnas (en haut), et à l'Est du Manaslu (en bas). 1 : métamorphisme 1 (m 1), sans doute du type HP-HT, marqué par un recuit intense anté-D₂ - 2 : déformation et métamorphisme 2 (m 2), associés au fonctionnement du M.C.T.; zone sans recuit - 3 : zones où le recuit s'est poursuivi après D₂. Les températures indiquées sont celles auxquelles s'est faite la structuration D₂.

FIG. 5. - Crust-scale sketch of two cross-sections, the one West of the Annapurnas, the bottom one East of the Manaslu. 1 : metamorphism 1 (m 1), probably HP-HT, and strong pre-D₂ recrystallisation - 2 : deformation and metamorphism 2, related to the M.C.T. shearing : zone without recrystallization - 3 : zones with post D₂ recrystallisation. The marked temperatures refer to the stage D₂. "Grand Décollement" : Great Basement Thrust.

prograde les roches du Moyen Pays et pouvant se traduire à la base de la Dalle du Tibet par une rétro-morphose, s'est fait dans des conditions de pression (et dans une bien moindre mesure, de température) beaucoup plus basses que les conditions P-T originelles atteintes à la base de la Dalle du Tibet. Des conditions de l'ordre de 450 °C pour environ 4 kb ont été proposées (A. Pécher, 1978, 1979).

Cette baisse de pression peut être liée à une érosion importante et rapide des superstructures au cours de ce chevauchement (A. Pécher, 1978). Il est aussi tentant d'envisager une dénudation tectonique importante et rapide de la Dalle lors de la tectonique à vergence Nord qui existe au niveau des Annapurnas (plis des Nilgiris - Annapurnas, fig. 5) (A. Pécher, 1978; P. Bordet *et al.*, 1981). A titre d'hypothèse, on peut voir dans cette tectonique à vergence Nord le contre-coup du redressement du M.C.T. à faible profondeur, au fur et à mesure de la translation de la Dalle du Tibet, engendrant nécessairement à partir d'un certain stade l'instabilité gravitationnelle du système chevauchant en voie de blocage (hypothèse aussi proposée par L. Seeber et J.G. Armbruster, 1981).

Par ailleurs, l'absence de hautes pressions dans le Moyen Pays implique une désolidarisation très importante entre la Dalle du Tibet et la croûte profonde sous-jacente à l'origine. De nos jours, les données sismiques permettent de mettre en évidence une nouvelle zone de désolidarisation semblable à la précédente et la relayant en profondeur (P. Molnar *et al.*, 1977; L. Seeber et J.G. Armbruster, 1981); c'est le « grand décollement » indiqué sur la figure 5.

D. Conclusions.

Les nouvelles données présentées ici montrent que l'homogénéité du métamorphisme himalayen dans la zone du M.C.T. n'est qu'apparente. De nouvelles études minéralogiques à la microsonde sur les différentes phases minérales sont certes indispensables pour préciser les conditions d'équilibre entre certains minéraux typomorphes de part et d'autre du M.C.T. et fournir des données plus fines sur les conditions pression-température. Mais, comme divers auteurs l'ont décrit, les associations minérales de part et d'autre du M.C.T. impliquent bien un *métamorphisme inverse* quant à son état thermique global.

Cependant, l'existence d'associations minérales rétrogrades à la base de la Dalle du Tibet démontrent en Kali Gandaki son caractère *plurifacial et hétérochronique*, caractères qui s'estompent au niveau des

Annapurnas et du Manaslu par une *accordance thermique*.

Il faut donc distinguer :

1) *Le métamorphisme normal « éohimalayen »*, bien marqué dans la Dalle du Tibet tout au long de la haute chaîne. Hypothétiquement lié à un épaississement crustal précoce, il est très mal caractérisé géochronologiquement. Peut-être faut-il lui rapporter les âges de l'ordre de 30 m.a (Rb/Sr sur minéraux obtenus en Himachal, 500 km plus à l'Ouest) (W. Frank *et al.*, 1977), qui correspondraient à une limite jeune pour le pic thermique, lui-même probablement postérieur aux conditions barroviennes *sensu stricto*.

2) *Le métamorphisme inverse*, de moyenne pression et de température éventuellement élevée, *rétromorphique* (sauf *accordance thermique*) à la base de la Dalle du Tibet et *prograde* dans le Moyen Pays, a dû être réalisé sous le M.C.T. par déformation transitoire des isothermes lors du transport de la Dalle du Tibet encore à haute température. On peut lui rapporter les âges Rb/Sr sur biotite obtenus plus à l'Ouest (W. Frank *et al.*, 1977) ou les âges K/Ar obtenus dans la région de l'Everest, 200 km plus à l'Est (D. Krummenacher *et al.*, 1978) qui indiquent des fermetures de minéraux entre 15 et 20 m.a. Ces âges sont aussi ceux obtenus en Rb/Sr sur minéraux pour le granite de Manaslu (15,3 à 20,5 m.a., Ph. Vidal *et al.*, 1982) granite considéré comme le produit de la fusion anatectique tardi-cinématique de la Dalle du Tibet (P. Le Fort, 1981).

L'hétérochronisme des âges sur minéraux est donc connu et bien marqué en Himachal (W. Frank *et al.*, 1977), région située à 500 km plus à l'Ouest du secteur considéré ici, et où il existe un hiatus thermique important de part et d'autre du M.C.T. (J. Andrieux *et al.*, 1981). Il devrait théoriquement s'estomper au niveau des Annapurnas, où il y a *accordance thermique*, nécessairement tardive (vers 16 m.a. ?). L'existence des klippe de Kathmandu et du Mahabarat implique cependant aussi des translations tardi-métamorphiques importantes plus à l'Est (M. Brunel et J. Andrieux, 1981).

3) *Un métamorphisme rétrograde* du faciès des schistes verts de bas degré, lié à des circulations de fluides de basse température (250°) mais sans doute aussi à des mouvements à froid du M.C.T. d'ampleur inconnue.

Ainsi l'Himalaya est marqué par une évolution métamorphique où se succèdent un épisode barrovien, suivi d'un épisode de plus haute température, les deux épisodes étant nettement distincts dans l'histoire du M.C.T. (de l'ordre de 15 m.a. entre des deux régi-

mes ?). On retrouve donc ici une succession analogue à celle décrite dans de nombreuses chaînes : Alpes Occidentales (où l'hétérochronisme dépasserait 40 m.a., J.C. Hunziker, 1974), Calédonien du Groënland (50 m.a. env., R.H. Steiger *et al.*, 1979) ou Massif Central Français (60 m.a., C. Pin, 1979) par exemple.

RÉFÉRENCES

- ANDRIEUX J., ARTHAUD F., BRUNEZ M. et SAUNIAU S. (1981). - Le caractère post-métamorphique des grands chevauchements himalayens dans l'Himalaya du Nord-Ouest. Aperçu sur les relations possibles avec le métamorphisme inverse du Népal. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 291, Série D, p. 525-528.
- BIRD P. (1978). - Initiation of intracontinental subduction in the Himalaya. *J. Geophys. Res.*, vol. 83, p. 4975-4987.
- BOUCHEZ J.L. et PECHER A. (1976). - Plasticité du quartz et sens de cisaillement dans des quartzites du grand chevauchement central himalayen. *Bull. Soc. géol. France*, vol. 7, t. XVIII, n° 6, p. 1377-1385.
- BOUCHEZ J.L. et PECHER A. (1981). - The Himalayan Main Central Thrust pile and its quartz-rich tectonites in Central Nepal. *Tectonophysics*, 78, p. 23-50.
- BORDET P., COLCHEN M., LE FORT P. et PECHER A. (1981). - The geodynamic evolution of the Himalaya. Ten years of research in Central Nepal Himalaya and some others regions. *Geodynamic Series*, vol. 3, *Am. geophys. Union*, p. 149-168.
- BRUNEL M. et ANDRIEUX J. (1981). - Sur un modèle tectonique explicatif du métamorphisme « inversé » himalayen. *C.R. Acad. Sc. Paris*, Série D.
- FRANK W., HOINKES G., MILLER C., PURTSCHELLER F., RICHTER W. et THÖNI M. (1973). - Relations between metamorphism and orogeny in a typical section of Indian Himalayas. *Tschermaks Min. Petr. Mitt.*, vol. 20, p. 303-332.
- FRANK W., THÖNI M. et PURTSCHELLER F. (1977). - Geology and petrology of Kulu - South Lahul area. *Coll. Intern. C.N.R.S.*, n° 268 : Ecologie et Géologie de l'Himalaya ; Sèvres, 1976. Sc. de la Terre, p. 147-172.
- HASHIMOTO S. *et al.* (1973). - Geology of the Nepal Himalayas. Saikon Publishing CO., Sapporo, Japon, 286 p.
- HUNZIKER J.C. (1974). - Rb/Sr and K/Ar age determinations and the Alpine tectonic history of the Western Alps. *Mem. Inst. Geol. Min. Univ.*, Padova, 31, 54 p.
- KRUMMENACHER D., BASETT A.M., KINGERY F.A. et LAYNE H.F. (1978). - Petrology metamorphism and K/Ar age determinations in Eastern Nepal. In « Tectonic Geology of the Himalaya », P.S. Saklani éd., Dehli, Today and Tomorrow's Printer, p. 151-166.
- LASSERRE J.L. (1977). - Amphibolites and alkaline gneisses in the Midlands Formations of Nepal. *Coll. Intern. C.N.R.S.*, n° 268 : Ecologie et Géologie de l'Himalaya, Sèvres, 1976, Sc. de la Terre, p. 147-172.
- LE FORT P. (1974). - Modèle thermique de la subduction intracontinentale himalayenne. *C.R. 2^e Réunion. Ann. Sc. de la Terre*, Pont-à-Mousson, p. 253.
- LE FORT P. (1975). - Himalayas : the collided range. Present knowledge of the continental arc. *Am. J. Sci.*, vol. 275 A, p. 1-44.
- LE FORT P. (1981). - Manaslu leucogranite : a collision signature of the Himalaya. A model for its genesis and emplacement. *J. Geophys. Res.*, vol. 86, n° B 11, p. 10545-10568.
- LE FORT P., PECHER A. et VIDAL P. (1982). - Les gneiss ceillés de la Dalle du Tibet : un épisode magmatique au Paléozoïque inférieur en Himalaya du Népal. *C.R. 9^e Réunion. Ann. Sc. de la Terre*, Paris, p. 369.
- LEROY J. (1979). - Contribution à l'étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de leur décré-pitation. *Bull. Min.*, vol. 102, p. 584-593.
- MOLNAR P., CHEN W.P., FITCH T.J., TAPPONNIER P., WARSI W.E.K. et WU F.T. (1977). - Structure and tectonics of the Himalaya : a brief summary of relevant geophysical observations. *Coll. Intern. C.N.R.S.*, n° 268 : Ecologie et Géologie de l'Himalaya, Sèvres, 1976, Sc. de la Terre, p. 269-285.
- PECHER A. (1974). - Métamorphisme et tectonique en régime de subduction intracontinentale. L'exemple du massif des Annapurnas (Himalaya du Népal Central). *C.R. 2^e Réunion. Ann. Sc. de la Terre*, Pont-à-Mousson, p. 311.
- PECHER A. (1978). - Déformation et métamorphisme associés à une zone de cisaillement. Exemple du Grand Chevauchement Central Himalayen (M.C.T.), transversale des Annapurnas et du Manaslu, Népal. Thèse Dr. Sc. Grenoble, 354 p., ronéot.
- PECHER A. (1979). - Les inclusions fluides des quartz d'exsudation de la zone du M.C.T. himalayen au Népal Central. *Bull. Minéral.*, vol. 102, p. 537-544.
- PECHER A. (1981). - Experimental decrepitation and reequilibration of fluid inclusions in synthetic quartz. *Tectonophysics*, vol. 78, p. 567-583.
- PIN C. (1979). - Géochronologie U-Pb et microtectonique des séries métamorphiques anté-stéphaniennes de l'Aubrac et de la région de Marvejols (Massif Central). Thèse 3^e C. Montpellier, 205 p., ronéot.
- SAXENA M.N. (1973). - Migration of metamorphic domains, sequential metamorphism and thermal structures in a direction opposite to the directions of migration of geosynclines during the great Himalayan tectonic cycle. Dans : « *Recent researches in geology* », vol. 1, p. 201-218, Dehli Hindustan Publishing Corporation.
- SEEBER L. et ARMBRUSTER J.G. (1981). - Great detachment earthquakes along the Himalayan Arc and long-term fore casting. Earthquake Prediction, *Am. Geophysical Union*, p. 259-277.
- STEIGER R.H., HANSEN B.T., SCHULER C., BAR M.T. et HENRIKSEN N. (1979). - Polyorogenic nature of the Southern Caledonian fold belt. Dans « East Greenland : an isotopic age study ». *J. of Geology*, 87, p. 475-495.
- VIDAL Ph., COCHERIE A. et LEFORT P. (1982). - Geochemical investigations of the origin of the Manaslu leucogranite (Himalaya, Nepal). *Geochem. Cosmochem. Acta*, 46, p. 2279-2292.

Manuscrit déposé le 14 décembre 1981,
accepté le 15 septembre 1982.