Zeitschrift: Eclogae Geologicae Helvetiae
Herausgeber: Schweizerische Geologische Gesellschaft
Band: 82 (1989)
Heft: 2

Artikel: La structure du Haut-Himalaya au Garhwal (Indes)
Autor: Pêcher, Arnaud / Scaillet, Bruno
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-166394

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 14.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Eclogae geol. Helv. 82/2: 655–668 (1989)

0012-9402/89/020655–14 $ 1.50 + 0.20/0
© 1989 Birkhäuser Verlag, Basel

La structure du Haut-Himalaya au Garhwal (Indes)

Par Arnaud Pêcher[1]) et Bruno Scaillet[2])

RÉSUMÉ

Au Garhwal comme ailleurs en Himalaya, l'ossature cristalline de la Haute-Chaîne est formée de plusieurs unités superposées. L'analyse des principaux marqueurs structuraux permet de distinguer plusieurs domaines tectoniques: 1) en dessous du chevauchement ductile principal (le Vaikrita Thrust), un domaine où la linéation d'étirement, très pénétrative, est conforme à la direction de convergence globale de la chaîne, 2) au-dessus, les gneiss du cristallin du Haut-Himalaya caractérisés par une rotation horaire progressive de la linéation, par des plis synmétamorphes d'orientations variables, et par un aplatissement accompagné d'un étirement est-ouest, 3) au sommet de la pile, la base des formations sédimentaires du Haut-Himalaya, percée par plusieurs petits plutons granitiques, caractérisée par un fort aplatissement, une direction d'extension est-ouest et des indices de décollement gravitaires (plis tardimétamorphiques à vergence Nord). La cartographie de la linéation d'étirement indique que cette zone de découplage tectonique entre le soubassement métamorphique et sa couverture sédimentaire correspond à une zone de décrochement ductile dextre, ayant pu accommoder les mouvements relatifs de l'Inde et du Tibet au moment de l'épaississement crustal syn-MCT.

ABSTRACT

In Garhwal, the Higher Himalaya is made up of a pile of crystalline tectonic units. Based on the analysis of the main strain markers, one can distinguish the following domains: 1) below the main thrust (locally known as the Vaikrita Thrust), a zone where the lineation, quite penetrative, is parallel to the direction of shortening at the scale of the range, 2) above the thrust, in the Higher Himalayan crystallines, the lineation progressively rotates, syn-metamorphic folds have no preferrential orientation, and finite strain corresponds to flattening plus East-West extension, 3) at the top of the metamorphic pile, the base of the sedimentary cover is characterized by a marked flattening and by collapse structures, due to northward gravity sliding. Mapping of the stretching direction indicates that the transition zone between the crystalline and its cover is a large ductile shear zone accounting for movements of Tibet relative to India at the time of the Himalaya crustal thickening.

Introduction

Le texte qui suit concerne les structures du cristallin du Haut-Himalaya au Garhwal (fig. 1), telles que nous avons pu les oberver dans la région de Gangotri (78° 56′ 27″ E, 30° 59′ 35″ N, cf. fig. 2). L'essentiel des données provient de deux coupes transversales à l'axe de la chaîne, s'étendant l'une et l'autre sur environ 40 km du sud au nord: la première dans la vallée de la Bhaghirati, le long de la route Uttarkashi-Gangotri, l'autre 25 km plus à l'est, le long de la Bhillangana, entre Ghuttu et les alpages de Khatling (fig. 2).

[1]) Institut Dolomieu, ERA CNRS n° 69, 38031 Grenoble.

[2]) C.R.P.G., CNRS, B.P. 20, 54501 – Vandœuvre-lès-Nancy.

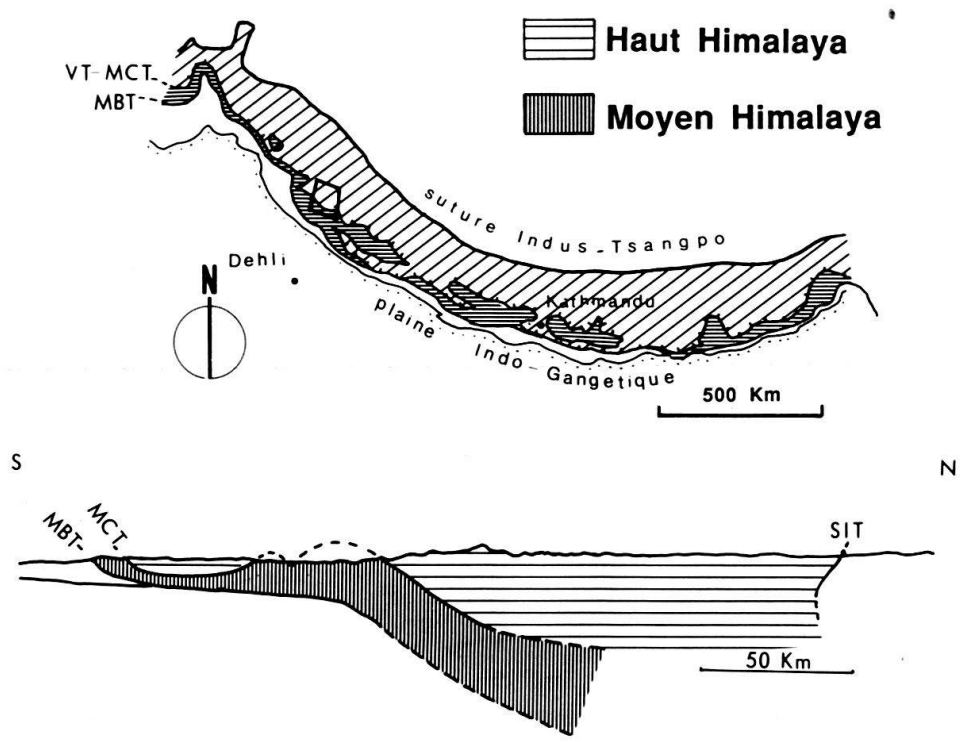

Fig. 1. Carte de localisation du secteur étudié et coupe générale schématique de la chaîne himalayenne (simplifié d'après Molnar 1984.

1. Les grands ensembles lithostructuraux

On retrouve pour l'essentiel au Garhwal les mêmes grands ensembles litho-tectoniques que dans le reste de l'Himalaya, disposés en lanières parallèles à l'axe de la chaîne, orientée dans cette portion de l'Himalaya N 125° E. Du nord au sud, c'est-à-dire du bas en haut de la pile tectonique, on distingue (figs. 2 et 3):

i) Les formations du Bas-Himalaya (fig. 1), faites surtout d'unités para-autochtones («Krol belt» au sud, formations de Tejam plus au nord, cf. Valdiya 1979). Elles n'affleurent pas dans les parties de sections étudiées ici,

ii) Au-dessus, séparées des précédentes par un grand chevauchement (le Main Central Thrust ou MCT de Heim & Gansser 1939), les nappes cristallines du Moyen-Himalaya peuvent subsister sous forme de klippes cristallines jusque très à l'extérieur de la chaîne (klippe de Landsdowne, au Kumaun méridional); elles s'enracinent en écailles complexes à la base de la Haute-Chaîne,

iii) Enfin, le cristallin du Haut-Himalaya, soubassement métamorphique des Séries Sédimentaires Tibétaines. Il chevauche les unités du Moyen-Himalaya par l'intermédiaire du «Vaikrita Thrust» (Valdiya 1980a), chevauchement majeur de cette partie de l'Himalaya et équivalent du MCT tel que défini au Népal par les auteurs français (Bordet et al. 1981).

Au Garhwal comme dans le reste de la chaîne, les formations du Moyen-Himalaya sont faites pour l'essentiel de formations azoïques, à forte empreinte volcanique ou volcano-détritique, d'âge probable précambrien (âges riphéens des sills granitiques interfoliés et des «porphyroïdes de Ramgarh», Bhanot et al. 1980), découpées par de nom-

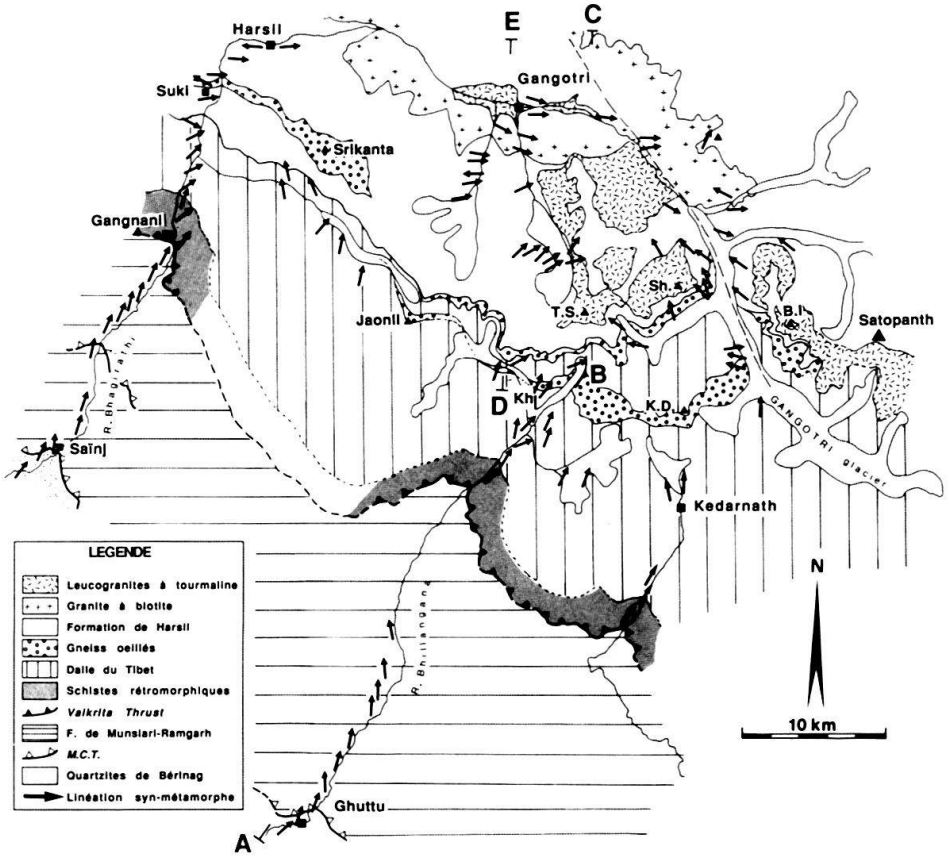

Fig. 2. Carte géologique simplifiée de la région de Gangotri. ABC et DE: position des coupes de la fig. 3: Dans les zones où de nombreuses mesures de linéation ont pu être effectuées, la direction reportée (flèche) correspond à la meilleure direction calculée sur des regroupements de mesures. Kh: Khatling; K.D.: Kedarnath Dome; T.S.: Thaley Sagar; Sh: Shivling; B.I: Bhagirathi I.

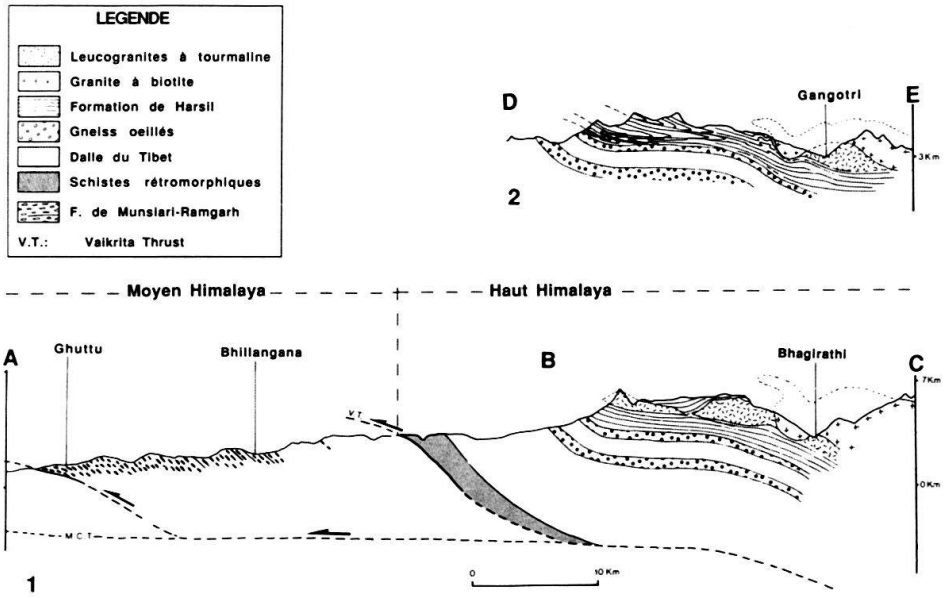

Fig. 3. Coupe du cristallin du Haut-Himalaya au Garhwal. 1) coupe générale au niveau de la Bhillangana; sur cette coupe, le MCT (Heim & Gansser 1939) est situé env. 10 km au sud de Ghuttu, 2) coupe de la partie sommitale de la pile tectonique au niveau de Gangotri, montrant les plis à vergence Nord dans la formation de Harsil.

breux chevauchements et failles. Les corrélations latérales sont donc difficiles, et la littérature utilise souvent une nomenclature, parfois confuse, à valeur locale (Saklani 1972, Rao & Pati 1980, Srivasta & Ahmad 1980, Virdi 1980, Pati & Rao 1981, Doval & Saklani 1981, Pant 1986). Nous avons donc gardé les appellations à valeur plus régionale proposées par Valdiya (1979, 1980b, 1981) au Kumaun.

Entre Uttarkashi (environ 10 km au sud-ouest de Sainj, fig. 2) et Gangotri, la route de la vallée supérieure de la Bhagirathi recoupe, dans d'excellentes conditions d'affleurement, 4 ensembles lithologiques principaux:

a) Au nord de la fenêtre d'Uttarkashi, où réapparaissent des terrains parautochtones, le premier ensemble rencontré est une épaisse série d'orthoquartzites, en bancs métriques, associés à des sills amphiboliques de puissance métrique ou plus. Ce sont les «quartzites de Berinag», dont il existe des équivalents en Moyen-Himalaya tout le long de la chaîne.

Cet ensemble quartzitique s'arrête au niveau de Saïnj (fig. 2), contre le MCT (Heim & Gansser 1939), accident seulement marqué par une bande de quelques dizaines de mètres d'épaisseur de schistes phyllonitiques.

b) Au nord du MCT, jusqu'au Vaikrita Thrust, la coupe montre un ensemble où prédominent des orthogneiss souvent porphyroïdes, à feldspaths potassiques pluricentimétriques, alternant avec des gneiss leucocrates satinés, à grain fin, riches en muscovites, des sills amphiboliques (d'épaisseur parfois pluridécamétrique), et, plus rarement, des métagrès et métapélites. Cet ensemble est repris en plusieurs endroits par des chevauchements secondaires à vergence Sud. Le plus important, qui se situe quelques km au nord du MCT, sépare un ensemble inférieur, riche en méta-arkoses, qui correspondrait aux «porphyroïdes de Ramgarh», d'un ensemble supérieur, ou «zone de Munsiari» (zone des racines des nappes cristallines du Moyen-Himalaya, Valdiya 1979). Un chevauchement froid du même type se retrouve en position analogue dans la vallée de la Bhillangana, peu au nord de Ghuttu (fig. 2).

c) On recoupe ensuite au niveau de la source chaude de Gangnani (fig. 2) le Vaikrita Thrust. Sa position est soulignée par une bande de schistes rétromorphiques à biotite verte-muscovite-grenat, riches en loupes de quartz d'exsudation, d'environ 2 km de puissance. Ces schistes, qui montrent de très nombreuses figures de déformation rotationnelle (bandes C/S, minéraux tournés, ou lentilles de quartz sigmoïdes), dérivent par phyllonitisation des gneiss susjacents. Nous les avons retrouvé plus à l'est, dans les vallées de la Bhillangana et de Kedarnath (fig. 2).

d) Au nord du Vaikrita Thrust, la route de Gangotri recoupe jusqu'à Suki (fig. 2) le cristallin du Haut-Himalaya (le «Vaikrita group» de Valdiya 1979, ou la «Dalle du Tibet» du Népal, Lombard 1958), qui forme une dalle massive, orientée en moyenne 130 NE 60 (azimuth: E 130°, pendage: 60° NE), d'environ 6 km de puissance. Elle est composée pour l'essentiel de gneiss feldspathiques à bio-grt-sta-ky, légèrement mobilisés dans la moitié supérieure de la série. La monotonie de cet ensemble est interrompue près de sa base par quelques niveaux subordonnés de cipolins (moins épais ici que plus à l'est dans la coupe de la Bhillangana) et d'amphibolites, et près de son sommet par un niveau décamétrique d'embréchites œillées; ce niveau est l'équivalent des épais sills d'orthogneiss qui se développent plus à l'est, dans la haute vallée de la Bhillangana (figs. 2 et 3), où leur puissance dépasse 1000 m., et de part et d'autre du glacier de Gangotri (dôme de Kedarnath).

e) Seule la base des Séries Sédimentaires du Haut-Himalaya affleure dans la vallée de la Bhagirathi (fig. 2): il s'agit des formations métasédimentaires de Harsil (Pant 1986) ou de Martoli (Valdiya 1979), d'âge inconnu (probablement Paléozoïque inférieur). On y reconnaît encore des grès et pélites sombres en bancs pluridécimétriques, avec de rares intercalations de niveaux carbonés ou carbonatés. Ils sont recoupés à l'est d'Harsil par de nombreux filons aplo-granitiques. Au nord du village de Suki (fig. 2), des niveaux de gneiss œillés (épaisseur totale d'environ 100 m), à mégacristaux de feldspath pluri-centimétriques sont «interstratifiés» dans les grès, formant une lentille qui se suit sur plus de 10 km vers le sud-est.

Les formations de Harsil forment l'encaissant des granites de la Haute-Bhagirathi, qui sont de 2 types:

- Un granite à biotite (granite à biotite d'Auden 1949, granite de Bhaïrongathi, Pant 1986), parfois assez fortement orienté, voire localement orthogneissifié, qui forme au fond de la Bhagirathi un massif de près de 30 km de long d'ouest en est. Son âge est inconnu; sa géochimie le rattacherait aux granites à 500 Ma de l'Himalaya (Stern et al. 1989).

- Un leucogranite à tourmaline et muscovite (granite de Badrinath, Heim & Gansser 1939, Gansser 1964, granite de Gangotri, Auden 1949), très peu orienté, qui forme plusieurs petits massifs intrusifs soit dans les formations de Harsil, soit dans le granite à biotite; ce granite, qui se rattache par ses caractères pétrographiques et son gisement aux leucogranites miocènes du Haut-Himalaya, a néanmoins fourni des âge Rb/Sr de 64+/−11 Ma sur roche totale, et de 21,1+/−0,9 Ma sur minéraux (Stern et al. 1989).

2. Déformation des séries du Moyen-Himalaya

Dans toutes la partie nord des formations du Moyen-Himalaya (quartzites de Berinag, formations de Ramgarh et de Munsiari) la structuration syn-métamorphique la plus visible est une très forte fabrique plano-linéaire. Le plan d'aplatissement est marqué par le clivage métamorphique (fig. 4a), de pendage moyen 30° vers le NE (tableau 1). Ce clivage est repris de manière plus ou moins pénétrative, à échelle métrique à millimétrique, par des plans de cisaillement moins pentés vers le nord, dessinant alors les structures de type C/S caractéristiques, bien connues maintenant dans nombre parties du Moyen-Himalaya (Pêcher 1977, Bouchez & Pêcher 1981, Brunel 1983, 1986). La dissymétrie de ces structures marque le caractère rotationnel de la déformation, le sens de rotation observé correspondant toujours à un mouvement du haut de la pile vers le sud. Ce sens de rotation est confirmé par les dissymétries observées au niveau des minéraux tournés (queues de cristallisation et inclusions sigmoïdes des grenats, rotation des mégacristaux feldspathiques des très nombreux niveaux de gneiss œillés) et par des boudins dissymétriques de gneiss ou d'amphibolites, d'allure très similaire à ceux décrits par Malavieille (1987).

En Bhagirathi, dans la zone du Vaikrita Thrust, le clivage tourne progressivement pour atteindre une direction méridienne (cf. fig. 7a), tandis que le pendage devient très raide (70° vers l'est). Cette rotation pourrait marquer le passage dans cette zone d'un décrochement ductile dextre, ayant valeur de rampe latérale associée au Vaikrita Thrust. On retrouve ici une géométrie déjà décrite en Himalaya central (Pêcher et al. 1987).

Dans tout ce domaine situé en dessous du Vaikrita Thrust, il existe une linéation très pénétrative: linéation minéralogique marquée par l'alignement des minéraux dans le plan de clivage métamorphique, et/ou linéation d'étirement marquée par les ombres de pression frangeant les minéraux syn-métamorphiques, parfois par le tronçonnement de ces minéraux, et surtout, dans les niveaux compétents, par un aspect «cordé», en mullions, de la roche; dans ce dernier cas, l'étirement peut parfois aller jusqu'à masquer la fabrique planaire.

Dans tout le domaine parcouru, l'orientation des linéations est très homogène, toujours NNE-SSW (fig. 4b et tableau 1): au Garhwal, comme dans tout le reste du Moyen-Himalaya, elle correspond à la direction de transport associée aux grands chevauchements à vergence sud (Mattauer 1975, Pêcher 1977, Brunel 1986).

3. Déformation du cristallin du Haut-Himalaya

Le cristallin du Haut-Himalaya se présente à l'échelle de l'affleurement et du paysage comme une large dalle monoclinale de gneiss à pendage nord régulier d'environ 40°. La linéation d'étirement est beaucoup moins nette que dans les nappes sous-jacentes. Lorsqu'elle est présente, elle est parallèle à linéation d'alignement des minéraux; nous avons donc confondus ces deux marqueurs (figs. 4c et 4d et tableau 1).

A la base de la pile, dans la zone de schistes rétromorphiques qui marquent le Vaikrita Thrust, on retrouve les mêmes éléments cinématiques que dans les formations du Moyen-Himalaya: i) structures de type C/S indiquant toujours, de l'échelle de la lamemince à l'échelle de la dizaine de mètres, un mouvement du compartiment supérieur

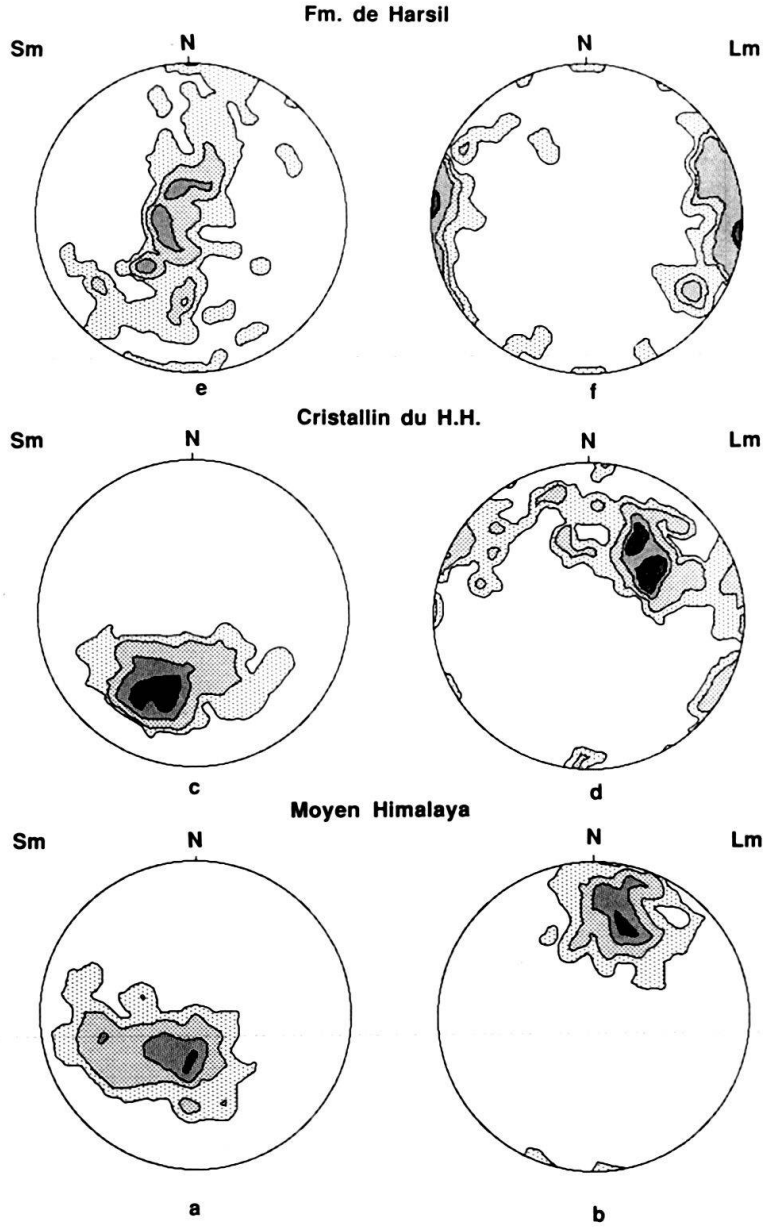

Fig. 4. Orientations du clivage et de la linéation métamorphique au Garhwal. Projections sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieur. Grille de comptage de 271 nœuds (canevas a, b, c et f) ou 331 nœuds (canevas d et e) (programme «SchmidtMac», A. Pêcher 1989) – (a) et (b): du MCT au Vaikrita Thrust, (a) schistosité (Sm), 163 mes., contours 2, 5, 10 et 15 fois la distribution uniforme (d.u.), (b) linéations minéralogique et/ou étirement (Lm), 145 mes., 2, 7, 15 et 22 d.u. – (c) et (d): cristallin du Haut-Himalaya, (c) Sm, 255 mes., 2, 5, 10, 15 d.u., (d) Lm, 107 mes., 2, 5, 10 et 15 d.u. – (e) et (f): Formation de Harsil, (e) Sm, 127 mes., 2, 6 et 12 d.u., (f) Lm, 75 mes., 2, 5, 10 et 20 d.u.

vers le sud-ouest, et ii) linéation d'étirement anté- à syn-rétromorphose à biotite-grenat, orientée maintenant NE-SW (tableau 1); il s'y superpose souvent une linéation tardive (stries de glissement sur les plans de clivage), qui souligne la pérennité des directions et sens de mouvement sur ce chevauchement aux différentes étapes de son histoire.

Au-dessus de cette zone, en montant dans la pile de gneiss, l'orientation du clivage métamorphique ne change pas. Par contre, la direction de la linéation (fig. 4d) n'est

Orientation des principaux marqueurs structuraux

	Sm	Lm	Lx	B1	B2	Bdn
SED. TIBETAIN	156 E 9 (122 m)		88 E 8 (80 m) (α = 19.1°)	90 E 7 178 S 12 (35 & 29 m)	98 E 12 (a) 106 E 7 (b) (20 &127 m)	174 N 16 102 E 3 (10 &13 m)
DALLE DU TIBET	111 N 40 (255 m) (α = 10.5°)		31 N 42 (107 m) (α = 19.6°)			12 N 37 (36 m)
dont : DT méd.& sup.	104 N 39 (208 m) (α = 11.2°)		31 N 40 (86 m) (α = 22.5°)			
Vaikrita Th.	137 E 47 (47 m) (α = 23.4°)		48 E 48 (21 m)			
MOYEN HIMALAYA	138 E 30 (163 m) (α = 13.5°)	13 N 33 (49 m)	14 N 30 (96 m)			
			15 N 31 (145 m)			
dont : Bhagirathi			21 N 36 (81 m)			
Bhillangana			9 N 24 (64 m)			

Tableau 1: Meilleurs pôles calculés pour les principaux éléments structuraux dans les différentes unités tectonique. Sm: clivage métamorphique; Lm: linéation minérale; Lx: linéation d'étirement (valeurs à cheval sur les 2 colonnes: Lx + Lm); B1: plis synmétamorphes; B2: plis tardi- à post-métamorphiques (a = meilleur pôle pour les axes B2, b = pôle du meilleur plan de dispersion de S1, équivalent à un axe B2 «moyen»); Bdn: grands axes des boudins synmétamorphiques. Sous chaque valeur est indiqué le nombre de mesures sur lequel porte la statistique. $\alpha = 1/2$ angle au sommet du cône de confiance à 0,95, calculé en admettant une statistique de type Bingham (cf. Cheeney, 1983).

plus conforme à la direction de transport des grands chevauchements himalayens, mais tend à s'aligner parallèlement à l'axe de la chaîne: ce passage se fait par rotation progressive dans le sens horaire de la ligne au fur et à mesure que l'on se rapproche de la limite socle cristallin-couverture sédimentaire (cf. fig. 7b), selon un processus déjà observé en Himalaya du Népal, dans la région de la Burhi Gandaki (Pêcher et al. 1984). De récentes mesures de déformation finie effectuées dans le cristallin du Haut-Himalaya 80 km plus à l'ouest par Jain & Anand (1988) montrent une rotation analogue.

Les gneiss du Haut-Himalaya montrent aussi d'assez nombreux plis synmétamorphes isoclinaux de petite taille (plis à axes courbes, voire de véritables plis en fourreau) et des structures de boudinage.

Les boudins sont surtout visibles dans le haut de la pile de gneiss, avec des tailles très variables (du mètre à l'hectomètre). Bien que leurs directions axiales soient assez dispersées, il se dessine un maximum NNE-SSW (tableau 1), transverse à la chaîne;

l'aplatissement s'est donc globalement accompagné, à échelle régionale, d'un étirement à peu près est-ouest. Dans cette zone, on note aussi l'existence de boudins dissymétriques, dont l'aspect sigmoïde (MALLAVIEILLE 1987) indique un mouvement de la partie supérieure de la pile vers le nord (faille normale).

De même, les niveaux d'orthogneiss sommitaux de la Dalle sont fréquemment affectés par des petits cisaillements ductiles à géométrie de faille normale; le long de la route de la Bhagirathi, en aval de Suki (fig. 2), la partie tout à fait sommitale de la Dalle du Tibet est recoupée par une zone de cisaillement de plusieurs mètres d'épaisseur, où les critères de mouvement indiquent là aussi un jeu en faille normale. Enfin, dans les crêtes au nord de Katling (fig. 2), de nombreux filons de granite recoupent le haut de la Dalle du Tibet et la base de la formation de Harsil (fig. 5); perpendiculaires au litage dans les gneiss, ils sont basculés vers le nord-ouest dans les niveaux schisteux (cisaillement vers le nord-ouest des niveaux ductiles).

Des accidents analogues, de type faille normale, près de la limite supérieure du cristallin du Haut-Himalaya, sont connus ailleurs dans la chaîne (au Zanskar: HERREN 1987, au Népal central: PÊCHER et al. 1984, dans la région de Nyalam, sud Tibet: BURG et al. 1984, BURCHFIELD & ROYDEN 1985), et peuvent contribuer à mettre en contact direct le sédimentaire peu métamorphique de la couverture de la Dalle et les migmatites. Ici, l'ampleur du déplacement n'est pas suffisante pour créer un tel hiatus métamorphique: on retrouve des gneiss à disthène de par et d'autre de la faille, disthène également présent sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur dans la base de la couverture.

4. Déformation de la base des séries sédimentaires tibétaines

La haute vallée de la Bhagirathi, le glacier de Gangotri (fig. 2) et ses glaciers affluents sont entaillés dans les formations métasédimentaires de Harsil et dans les leuco-

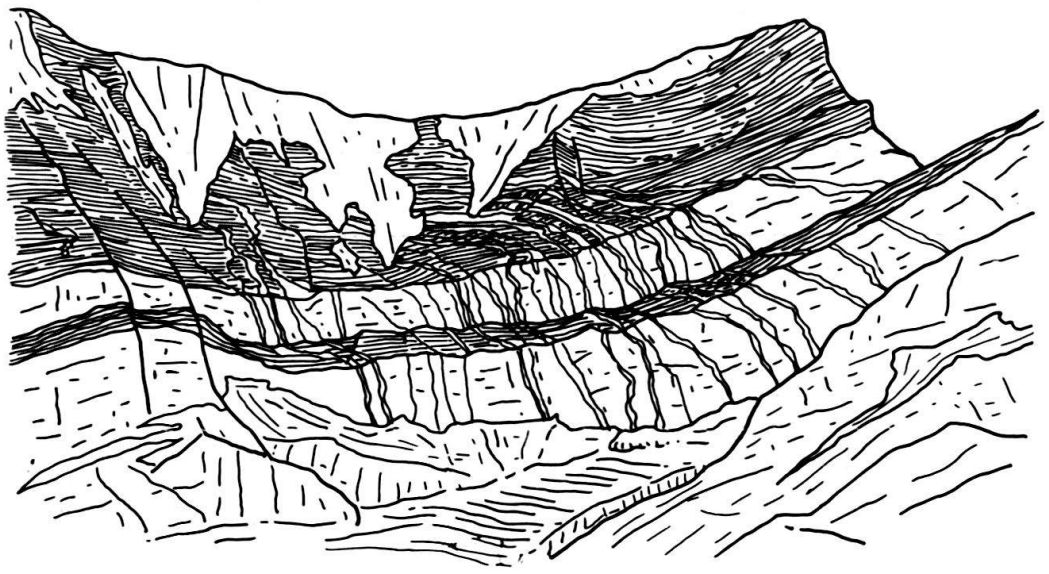

Fig. 5. Arête sud-est du Thaley Sagar, Haute-Bhillangana: filons de leucogranites recoupant la limite Dalle du Tibet – Formation de Harsil, indiquant un cisaillement vers le nord ouest.

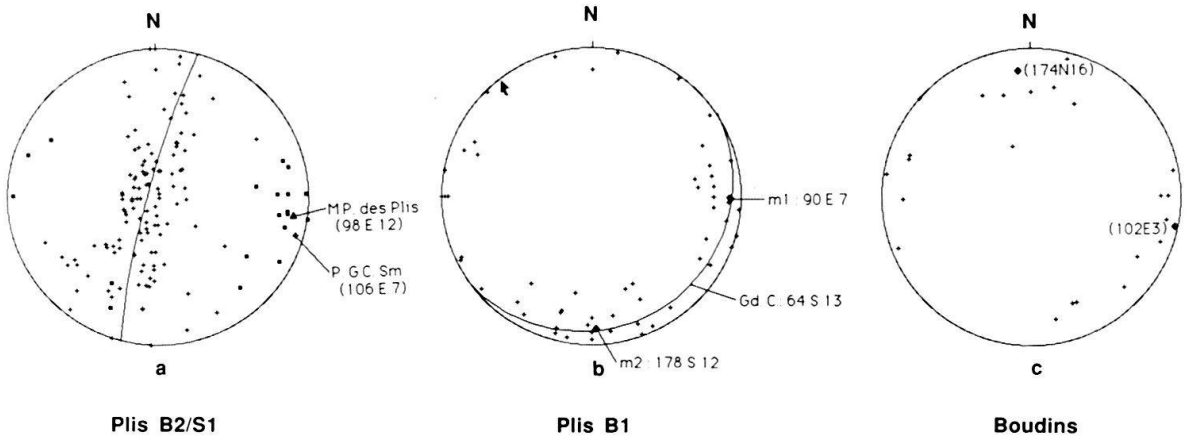

Fig. 6. Orientation des plis et des axes de boudin dans la Formation de Harsil. Projections sur canevas de Schmidt, hémisphère inférieur, (a) pôles de la schistosité (croix, 127 mes.) et des plis B2 (losanges, 20 mes.), avec indication du meilleur pôle des plis, du meilleur plan passant par les Sm et du pôle de ce plan – (b) Axes des plis B1 (61 mes.), avec indication des meilleurs pôles m1 et m2 des nuages, et du plan correspondant au meilleur pôle de la schistosité, calculé sur les 127 mes. du canevas a; on remarque que ce plan est aussi le plan de dispersion des axes B1, et contient m1 et m2 – (c) axes des boudins syn-métamorphiques (23 mes.), avec indication des meilleurs pôles des 2 nuages (meilleurs pôles des nuages calculés après classification automatique des points par la méthode des centres mobiles, programme SchmidtMac).

granites himalayens qui les recoupent. Le métamorphisme des formations de Harsil est caractérisé par des associations à disthène, staurotide et grenat dans le clivage métamorphique, avec surimposition de sillimanite et cordiérite post-schisteuse.

Le passage des gneiss sous-jacents à ces formations se fait sans discontinuité nette, ni métamorphique ni structurale; dans les niveaux structuraux les plus hauts atteints (environ 4 km au-dessus de la base de la formation), le litage sédimentaire est encore facilement identifiable; plus bas, il est presque complètement transposé par le clivage métamorphique S1, qui passe en continuité à la foliation des gneiss.

Ce clivage, dans l'ensemble assez plat, est dispersé (figs. 4e et 6a) par des plis B2 métriques à hectométriques de direction environ N 100° E (fig. 6a et tableau 1), parfois accompagnés d'un clivage S2 frustre. Leur direction, légèrement oblique par rapport à l'axe de la chaîne, est peut-être contrôlée par la géométrie du contact sud du granite à biotite. Ils sont dissymétriques (flanc court raide, flanc long plat), à regard ou à déversement vers le nord (cf. fig. 3): ils traduisent donc un mouvement de glissement-cisaillement tardimétamorphique de toute la base de la pile sédimentaire vers le nord, dans une structure «collapse» du même type que celle exprimée par le grand pli des Annapurnas en Himalaya du Népal (Bordet et al. 1981, Colchen et al. 1986).

La structuration précoce, syn-métamorphique, se marque par, outre le clivage S1, une linéation, des structures d'aplatissement (boudinage), et des plis:

La linéation (fig. 4f), très inégalement pénétrative d'un affleurement à l'autre, est marquée par l'allongement des taches de biotite et chlorite les ombres de pression, parfois dissymétriques, des grenats ou des grains de quartz détritiques, ou par le tronçonnement des minéraux aciculaires (tourmaline en particulier). C'est donc une linéation d'étirement. Les trajectoires de son orientation prolongent de manière tout à fait continue celles cartographiées dans les gneiss sous-jacents (fig. 7b): le mouvement de rota-

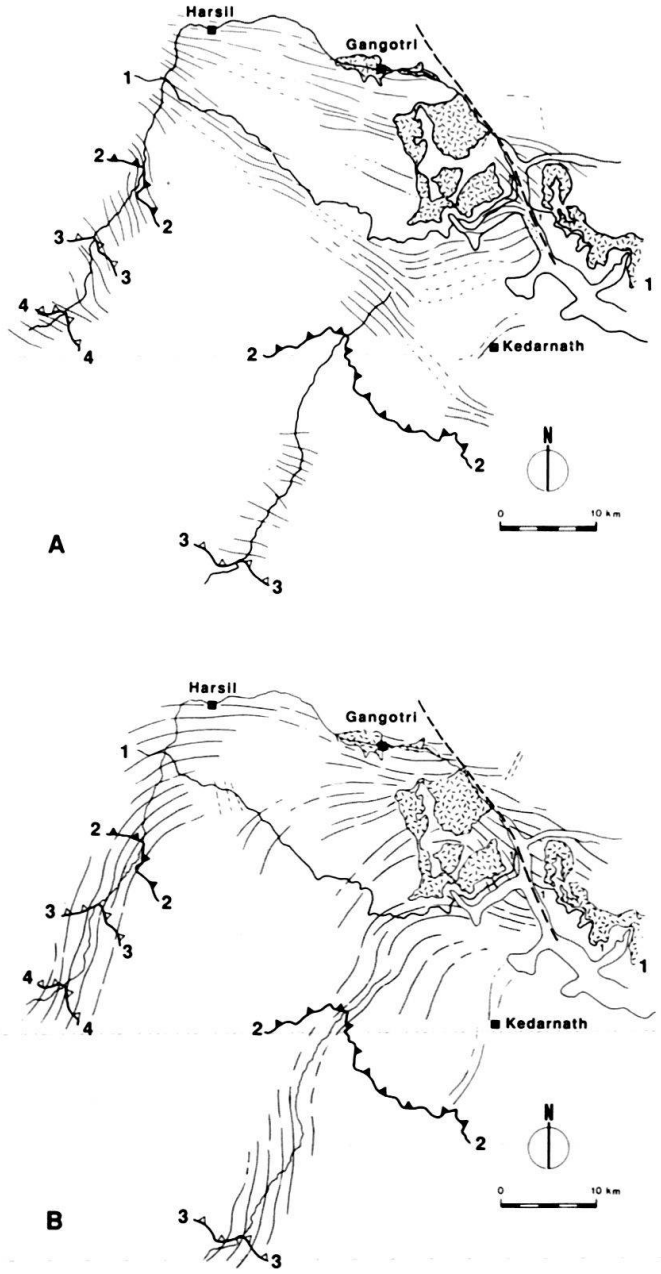

Fig. 7. Carte des trajectoires de la déformation finie, dessinée par interpolation des mesure. (a) Schistosité, (b) linéation minéralogique et/ou d'étirement. Géologie: sont indiqués les leucogranites, la limite supérieure de la Dalle du Tibet (1), le Vaikrita Thrust (2), le chevauchement séparant les formations de Munsiari et de Ramgarh (3) et le MCT de Heim & Gansser (4).

tion vers l'est se poursuit, la direction de la schistosité restant toujours la même, tandis que la linéation devient est-ouest. A l'échelle de la lame-mince, on s'aperçoit que le clivage métamorphique est souvent composite (associant des plans S et des plans C), et que la linéation d'étirement (observée en réalité sur des plans C) est aussi interprétable comme une linéation de cisaillement. La dissymétrique des micro-amandes C/S, ainsi que celle des ombres de pression, indique alors un mouvement des niveaux supérieurs vers l'est par rapport aux niveaux inférieurs.

Il existe d'assez nombreux plis B1, à axes souvent courbes, admettant le clivage métamorphique comme surface axiale. Malgré la dispersion des axes, on note deux orientations préférentielles: l'une, est-ouest, correspond aux mesures effectuées dans la partie la plus haute structuralement de la série, l'autre, nord-sud, aux mesures effectuées plus bas dans la série, sur des plis souvent en fourreau.

Les directions axiales des boudins (directions perpendiculaires aux directions d'étirement locales), montrent aussi une assez forte dispersion dans le plan de schistosité (fig. 6c), qui résulte probablement d'une forte composante d'aplatissement dans l'ellipsoïde de déformation finie à l'échelle de l'ensemble de la zone. Néanmoins, il ressort là aussi un regroupement en deux nuages, correspondant à deux directions préférentielles d'étirement, nord-sud et est-ouest. Cette dernière préfigure les structures collapses exprimées ultérieurement par les plis B2, alors que la direction nord-sud est compatible avec la direction d'étirement est-ouest marquée dans cette zone par la linéation.

5. Discussion

Les éléments présentés ci-dessus ne sont bien sûr pas complets. La cartographie des éléments structuraux, esquissée pour les formations du Moyen-Himalaya et pour la Dalle du Tibet à partir de 2 coupes seulement, devrait être plus détaillée, et surtout plus continue pour pouvoir expliquer certaines «anomalies»: par exemple, certaines rotations locales des trajectoires de schistosité dans le Moyen-Himalaya (indices de «rampe latérale», comme suggéré plus haut, ou de plis anté ou post-chevauchement de direction méridienne ?), ou encore l'existence dans les formations de Harsil de secteurs où la linéation est localement sécante sur sa direction cartographique moyenne (par exemple au sud de Harsil, fig. 7b). Néanmoins, l'allure générale des cartes des trajectoires de linéation et de foliation (fig. 7) fait ressortir une géométrie assez complexe, qui s'écarte des structures cylindriques habituellement décrites en Himalaya.

En fait, en ce qui concerne la carte des linéations, le cylindrisme est presque parfait dans le domaine situé en dessous du Vaikrita Thrust, dans la zone des nappes du Moyen-Himalaya. Dans cette zone, comme dans ses équivalents latéraux partout ailleurs en Himalaya, la structure est entièrement contrôlée par le jeu des chevauchements vers le sud, la linéation marquant la direction de transport (direction d'empilement des nappes). Elle correspond à la direction globale de convergence Inde-Tibet, et reste remarquablement constante d'un bout à l'autre de la chaîne (plus constante encore que suggéré par Brunel 1986): la direction mesurée au Garhwal est la même que celle que nous avons pu mesurer aussi bien plus à l'ouest (fenêtre de Kishtwar, par exemple, meilleur pôle de la linéation d'étirement: 178 N 24, Brouand & Pêcher, données non publiées) que plus à l'est, au Népal ou au Sikkim, et ce malgré la courbure de l'arc himalayen.

Au-dessus du Vaikrita Thrust (cristallin du Haut-Himalaya et séries de Harsil), la structure est plus complexe:

– Il existe une forte composante d'aplatissement, associée à un étirement est-ouest,

– La carte des trajectoires de linéation dessine très nettement une virgation (fig. 7b), qui correspond à une rotation progressive de la ligne au fur et à mesure que l'on monte dans la pile tectonométamorphique. Il est difficile d'interpréter cette virga-

tion en termes de rotation dans le temps de la direction de convergence himalayenne: en effet, si tel était le cas, la direction changerait brutalement d'une unité tectonique à l'autre, plutôt que progressivement à l'intérieur d'une même unité.

Par contre, si l'on tient compte du pendage globalement assez raide vers le nord de l'ensemble de la pile (en faisant donc abstraction des effets des structures collapses affectant la série de Harsil), on peut lier cette rotation à un décrochement ductile de grande ampleur, affectant la partie supérieure de la Dalle du Tibet et la partie inférieure de sa couverture. Son sens est dextre, comme l'indiquent la géométrie des trajectoires de linéation, les trajectoires de fluidalité magmatiques dans le leucogranite de Gangotri (Scaillet, en prép.) et les critères de cisaillement à échelle de l'affleurement ou de la lame-mince, qui indiquent systématiquement un déplacement des niveaux supérieurs (nord) vers l'est par rapport aux niveaux inférieurs.

L'âge de ce décrochement, qui a dû fonctionner pendant une longue période, est assez mal calé:

i) il reprend comme un marqueur passif la linéation précoce syn-métamorphique de la base de la Dalle du Tibet, qui est déjà associée à une déformation rotationnelle vers le sud de type MCT/Vaikrita Thrust; le décrochement est donc post-initialisation du Vaikrita Thrust,

ii) il est associé à l'étirement syn-métamorphique est-ouest, visible tant dans les gneiss de la Dalle que dans leur couverture; le décrochement à donc fonctionné dès le culmen thermique,

iii) la structuration des leucogranites les plus septentrionaux (Scaillet, en prép.) montre que le décrochement fonctionnait encore au moment de leur mise en place.

– Un dernier aspect important de la tectonique du Garhwal est l'existence de structures collapses ou de type faille normale, localisées elles aussi dans la zone de passage socle-couverture: d'une part, structures de boudinage dissymétrique du sommet du cristallin, plis B2 d'axes est-ouest à vergence nord et filons basculés vers le nord, d'autre part failles normales d'orientation est-ouest. Dans le premier cas, il s'agit d'une tectonique de type gravitaire surtout exprimée par des structures tardimétamorphiques (syn à post mise en place des granites ?), mais qui à pu débuter de manière assez précoce; dans le second cas, il s'agit d'une tectonique en extension postmétamorphique.

L'Himalaya du Garhwal apparait donc comme un jalon pour l'étude des structures de découplage entre l'axe cristallin de la haute chaîne et les formations situées plus au nord. Les données présentées ci-dessus montrent que cette zone de découplement est probablement très continue tout le long de la chaîne, où elle constituerait une limite majeure entre le bloc tibétain en voie d'extrusion vers l'est, et la croûte de l'Himalaya proprement dit, s'épaississant par le jeu des grands chevauchements type MCT.

Remerciements

Ce travail a été en partie réalisé à l'occasion d'une expédition conjointe franco-britannique vers les sommets du Shivling et du Bhagirathi I, où participaient P. Le Fort et J. Dardel ainsi que M. Searle, T. Rex et P. Metcalffe de l'Université de Leicester. Les auteurs tiennent à remercier K. Honegger et S. Schmid pour leurs relectures constructives du manuscrit. Les travaux de terrain ont été financés par le C.N.R.S. (GRECO: HIMALAYA–KARAKORUM).

RÉFÉRENCES

AUDEN, J.B. 1949: Records of the Geological Survey of India, 78/1, 74–78.

BHANOT, V., PANDE, B.K., SINGH, V.P., & KANSAL, A.K. 1980: Rb/Sr ages for some granitic and gneissic rocks of Kumaun and Himachal Pradesh. In: Stratigraphy and correlations of Lesser Himalayan Formations. (Ed. by VALDIYA, K.S., & BHATIA, S.B.). Hindustan Publ. Corp., Dehli, 139–142.

BORDET, P., COLCHEN, M., LE FORT, P., & PÊCHER, A. 1981: The geodynamic evolution of the Himalaya. Ten years of research in Central Nepal Himalaya and some others regions. In: Zagros – Hindukush – Himalaya: geodynamic evolution. (Ed. by GUPTA, H.K., & DELANY, F.M.). Amer. Geophys. Union, Washington, Geodynamics series 3, 149–168.

BOUCHEZ, J.L., & PÊCHER, A. 1981: The Himalayan Main Central Thrust pile and its quartz-rich tectonites in Central Nepal. Tectonophysics 78, 23–50.

BRUNEL, M. 1983: Etude pétrostructurale des chevauchements ductiles en Himalaya (Népal oriental, Himalaya du nord-ouest). Thèse, Paris.

— 1986: Ductile Thrusting in the Himalayas: shear sense criteria and stretching lineation. Tectonics 5, 247–265.

BURG, J.P., BRUNEL, M., GAPAIS, D., CHEN, G.M., & LIU, G.H. 1984: Deformation of leucogranites of the crystalline Main Central Thrust sheet in Southern Tibet (China). J. Struct. Geol. 6, 535–542.

BURCHFIELD, B.C., & BOYDEN, L.H. 1985: North-South extension within the convergent Himalayan region. Geology 13, 679–682.

CHEENEY, R.F. 1983: Statistical methods in geology. G. Allen & UNWIN, LONDON.

COLCHEN, M., LE FORT, P., & PÊCHER, A. 1986: Annapurnas, Manaslu, Ganesh Himal. Notice explicative de la carte géologique au 1/200 000. Editions du CNRS.

DOVAL, S.C., & SAKLANI, P.S. 1981: An introduction to the geology of the Ghuttu area, Garhwal himalaya, U.P. In: Contemporary geoscientific researches in Himalaya. (Ed. by A.K. Sinha), Dehra-Dun, v. 1, 121–123.

GANSSER, A. 1964: Geology of the Himalayas. Interscience Publishers, John Wiley & SONS, LONDON.

HEIM, A., & GANSSER, A. 1939: Central Himalayas: geological observations of the Swiss expedition of 1936. Mém. Soc. Helvétique de Sc. Nat. 73/1, 1–245.

HERREN, E. 1987: Zanskar shear zone: Northeast-Southwest extension within the Higher Himalayas (Ladakh, India). Geology 15, 409–413.

JAIN, A.K., & ANAND, A. 1988: Deformational and strain patterns of an intracontinental collision ductile shear zone – and example from the Higher Garhwal Himalaya. J. Struct. Geol. 10, 717–734.

LOMBARD, A. 1958: Un itinéraire géologique dans l'est du Népal (massif du Mont-Everest). Mém. Soc. Helvétique de Sc. Nat. 82, 1-107.

MALAVIEILLE, J. 1987: Kinematics of compressional and extensional ductile shearing deformation in a metamorphic core complex of the northeastern Basin and Range. J. Struct. Geol. 9, 541–554.

MATTAUER, M. 1975: Sur le mécanisme de formation de schistosité dans l'Himalaya. Earth Planet. Sc. Lett. 28, 144–154.

MOLNAR, P. 1984: Structure and tectonics of the Himalaya: Constraints and implications of geophysical data. Ann. Rev. Earth Planet Sci. 12, 489–518.

PANT, R. 1986: Petrochemistry and petrogenesis of the Gangotri granite and associated granitoids, Garhwal Himalaya. Thèse non publiée. Roorkee, Indes.

PATI, U.C., & RAO, P.N. 1981: The Main Central Thrust in U.P. Himalaya. In: Contemporary geoscientific researches in Himalaya, (Ed. by A.K. Sinha), Dehra-Dun, vol. 1, 125–129.

PÊCHER, A. 1977: Geology of the Nepal Himalaya: deformation and petrography in the Main Central Thrust zone. In: Ecologie et Géologie de l'Himalaya, ed. CNRS, Paris, 301–318.

— 1989: SchmidtMac, a program to display and analyse directionnal data. Computers and Geosciences, in press.

PÊCHER, A., BOUCHEZ, J.L., CUNEY, M., DENIEL, C., FRANCE-LANORD, C., & LE FORT, P. 1984: Himalaya central: une zone de cisaillement «haute température» longitudinale au sommet de la Dalle du Tibet. R.A.S.T., Bordeaux, p. 436.

PÊCHER, A., BARBEY, P., & BOUAND, M. 1987: Structures transverses syn-métamorphes dans le cristallin du Haut-Himalaya. Séminaire Himalaya Karakorum (résumé), Nancy, 55–56.

RAO, P.N., & PATI, U.C. 1980: Geology and tectonics of Bhillangana valley and its adjoining parts. Garhwal Himalaya, with special references to the Main Central Thrust. Himalayan Geol. 10, 220–233.

SAKLANI, P.S. 1972: Lithostratigraphy and structure of the area between the Bhagirathi and the Bhillangana rivers, Garhwal. Himalayan Geol. 2, 342–355.

Srivasta, R.N., & Ahmad, A. 1980: Geology and structure of Alaknanda valley, Garhwal Himalaya. Himalayan Geol. 10, 225–254.

Stern, C.R., Kligfield, R., Schelling, D., Virdi, N.S., Futa, K., Peterman, Z.E., & Amini, H. 1989: The Bhagirathi leucogranite of the High Himalayas (Garhwal, India): Age, petrogenesis, and tectonic implications – Geol. Soc. America, sp. paper 232, in press.

Valdiya, K.S. 1979: An outline of the structural set-up of the Kumaun Himalaya. J. Geol. Soc. India 20, 145–157.

— 1980a: The two intracrustal boundary Thrust of the Himalaya. Tectonophysics 66, 323–348.

— 1980b: Geology of Kumaun Lesser Himalaya. Wadia Institut of Himalayan Geology, Dehra Dun.

— 1981: Tectonics of the central sector of the Himalaya. In: Zagros – Hindukush – Himalaya: geodynamic evolution. (Ed. by Gupta, H.K., & Delany, F.M.), Amer. Geophys. Union, Washington, Geodynamics series 3, 87–110.

Virdi, N.S. 1980: Problem of the root zone of nappes in the Western Himalaya: a critical review. Himalayan Geol. 10, 55–77.

Manuscrit reçu le 16 décembre 1988
Révision acceptée le 16 mai 1989