

Géologie autour du Manaslu (un trek au Népal central)

Arnaud Pêcher et Monique Fort

La première édition de ce livret-guide a été établie par Arnaud Pêcher pour l'encadrement d'une excursion géologique au Népal d'un groupe de professeurs de SVT en 2011; excursion reprise en 2012 dans le cadre d'une excursion initiée par le Comité Scientifique de la FFCAM. La version proposée ici prend en compte les retours d'expérience des années 2011 et 2012 (ajustement des étapes, intérêt géologique des arrêts).

Notes :

- Le tour proposé se fait en 16 jours de Kathmandou à Kathmandou. Il peut être raccourci de 2 jours en supprimant les journées J6 (montée dans la vallée de Hinang) et J11 (montée au lac de Ponkar). Ces deux journées, qui sont des A-R depuis l'itinéraire principal, peuvent aussi être utilisées différemment : par exemple pour de l'acclimatation avant le col, autour de Samdo (p.64). Par ailleurs, la route jeepable gagne rapidement du terrain : en automne 2012, elle dépassait en Burhi Gandaki le village de Lapubesi, à une journée de marche au Nord d'Arughat; à la descente, on rejoint à Dharapani la nouvelle route de la Marsyandi, et une piste était en construction en Dudh Khola ! On peut donc envisager de faire ce tour en une dizaine de jours, mais ce serait dommage...

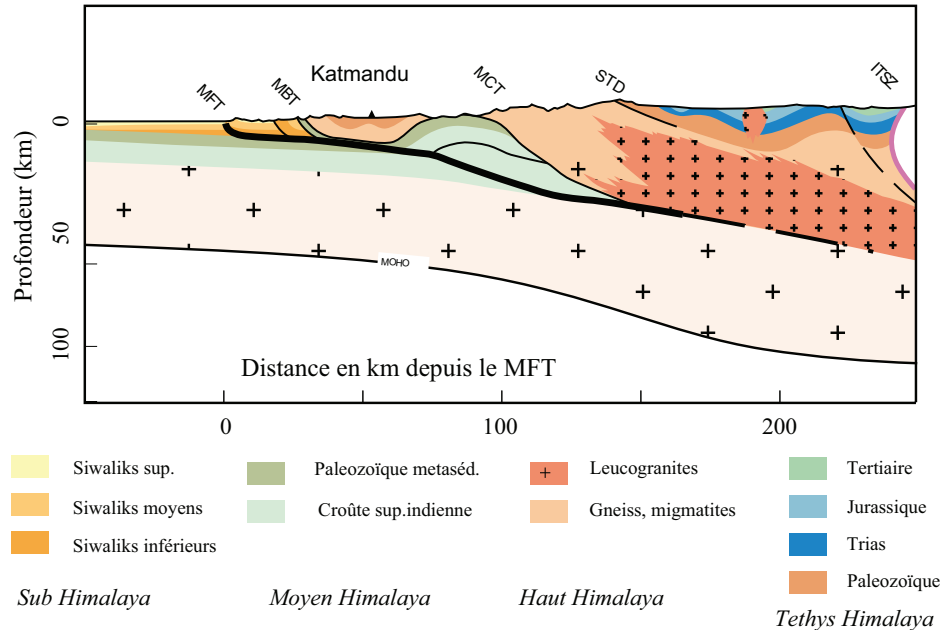
- La meilleure période pour ce trek est l'automne : meilleure luminosité et meilleure vue sur les sommets qu'au printemps, col du Larkya normalement peu enneigé et facile à passer, mais températures pouvant être assez basses (mi-Novembre 2012, nous avons eu -20°C la nuit à Dharamsala, au pied du col)

L'organisation pratique des excursions 2011 et 2012 avait été confiée à l'agence "Aux 4 Coins du Monde", 1 rue Aubert Dubayet, 38100 - Grenoble , tél. (33) 476 431 647

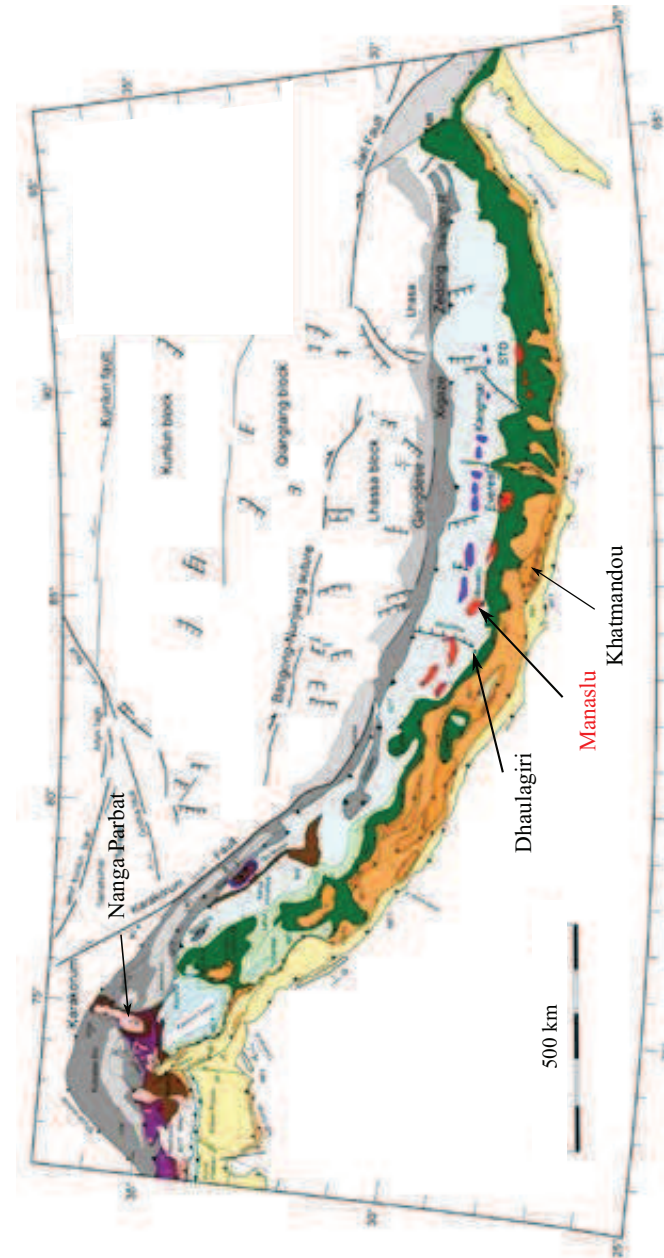




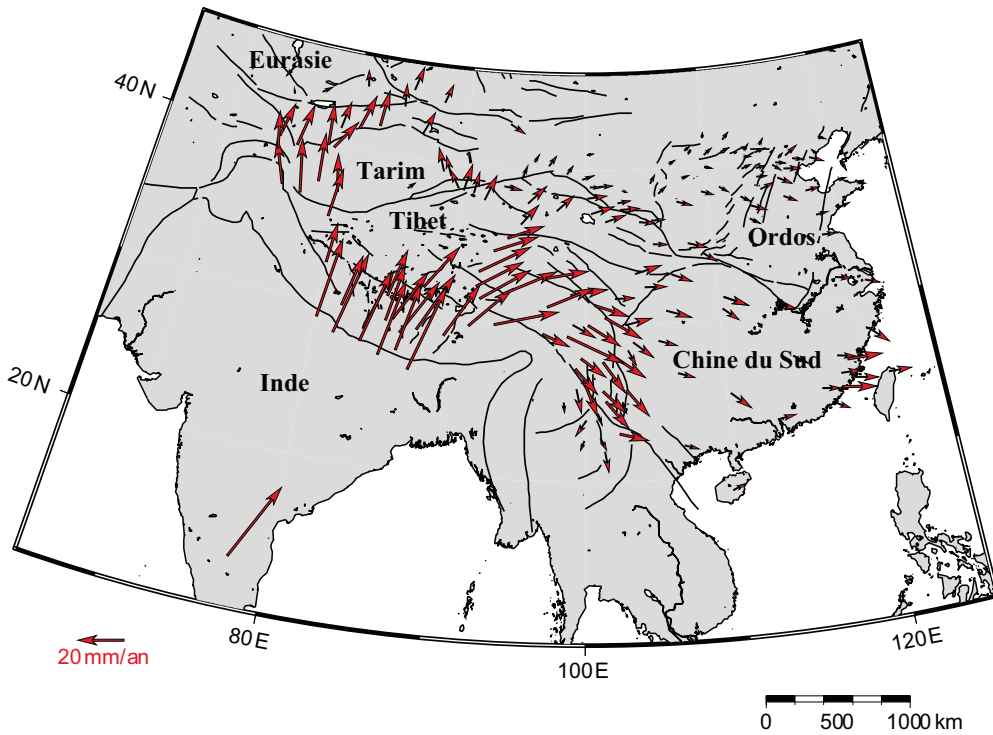
L'Himalaya et le Tibet, vus de la navette spatiale. Vue prise à peu près à l'aplomb de l'Everest, vers l'Ouest. On reconnaît de gauche à droite la plaine du Gange et les bassins intra-Siwaliks (les "duns"), l'Himalaya très enneigé, un peu en arrière la dépression du Tsangpo (la suture), et le Tibet avec ses nombreux lacs souvent salés. En rouge, notre trek !



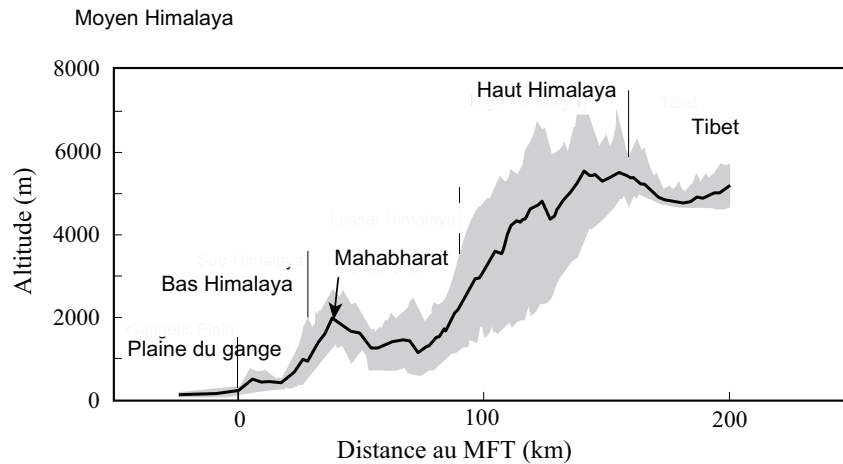
Une coupe de l'Himalaya Central au niveau de Kathmandou. Le trait épais correspond au MHT (Chevauchement Himalayen Principal, Main Himalayan Thrust, se terminant en surface par le chevauchement frontal, MFT) sur lequel se greffent les autres chevauchements majeurs (in Avouac, 2007)



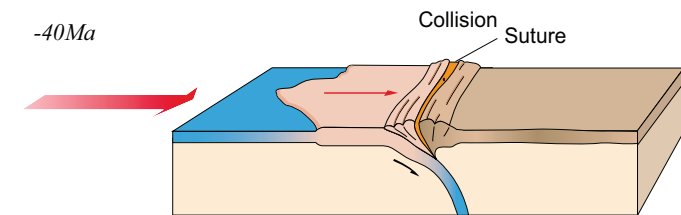
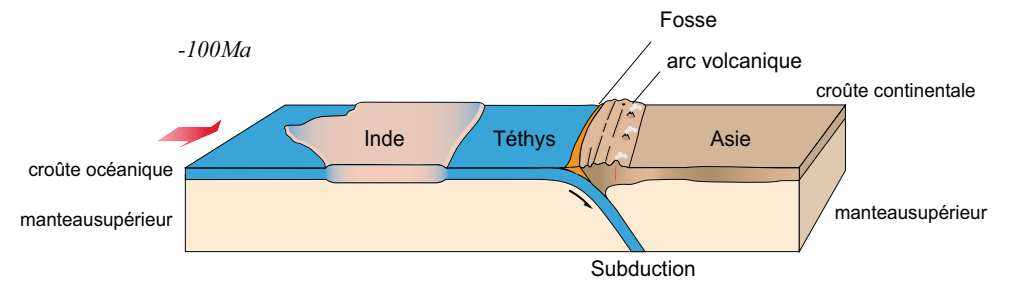
Une carte générale de l'arc Himalayen, entre virgation du Nanga Parbat, à l'Ouest et virgation du Namche Barwa, à l'Est. Du Sud au Nord se succèdent : le chaînon mio-pliocène et quaternaire des Siwaliks (jaune pâle); les nappes du Moyen Himalaya (brun pâle); le Cristallin du Haut Himalaya (vert); les séries sédimentaires de couverture (Cambrien-Crétacé sup) (en bleu); recouvertes par les granites miocènes du Haut Himalaya (en rouge), et les dômes de gneiss et granites du Nord Himalaya (en violet); les séries de la Suture (flysch, molasses, ophiolites) (en gris). En Himalaya de l'Ouest (Nanga Parbat), on peut reconnaître un socle précambrien (en rose) et sa couverture métamorphique, où sont impliquées les séries téthysiennes (en brun et violet). Une autre carte un peu plus détaillée se trouve p. 66



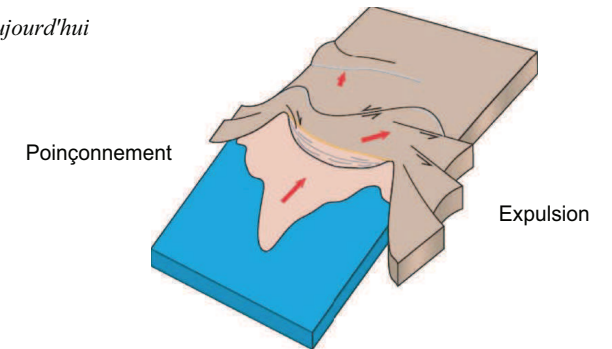
Déplacements actuels des blocs de l'Inde et de l'Asie du Sud-Est par rapport à l'Eurasie stable. Mesures au GPS sur environ 10 ans (d'après Wang et al., 2001, in Avouac, 2007).



Altitudes minimum, maximum et moyenne dans une bande de 50 km de large centrée sur la coupe du Langtang, un peu à l'Est du Manaslu (d'après Avouac, 2007)

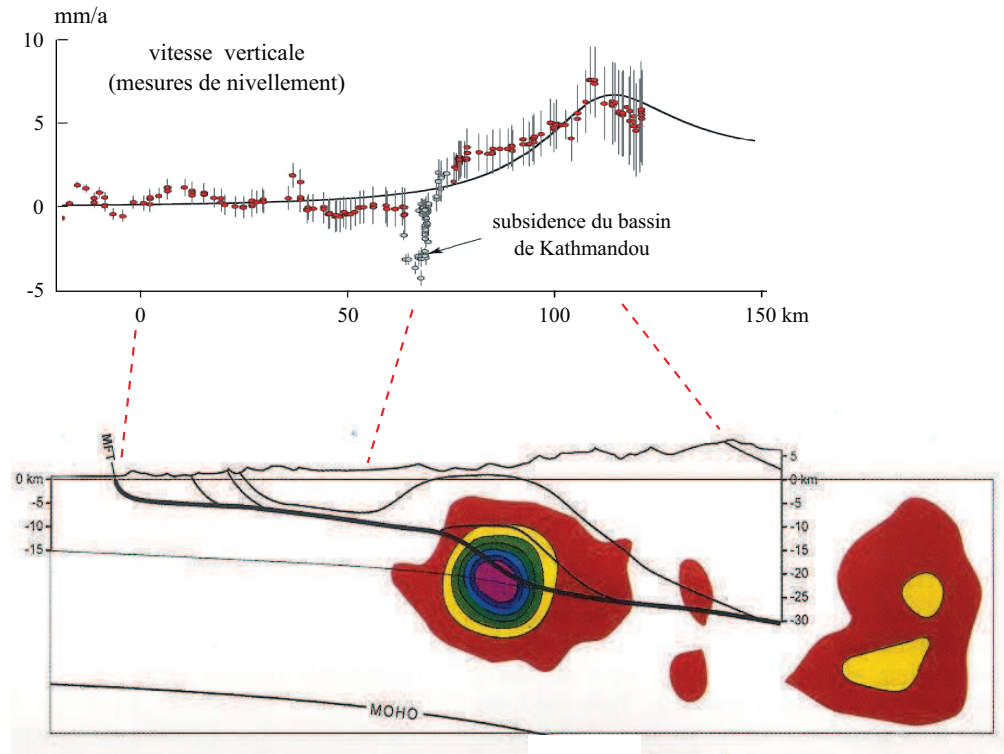
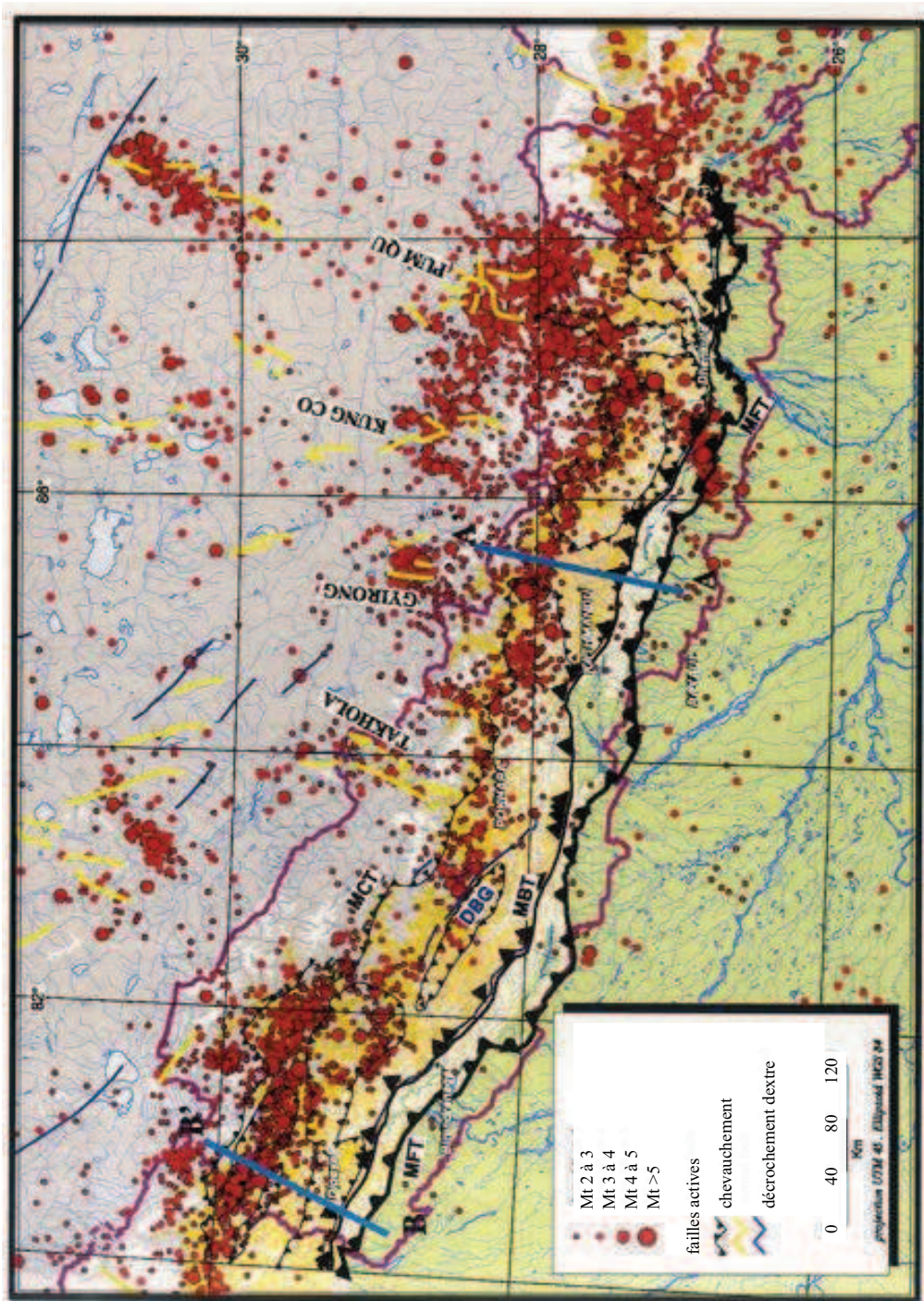


aujourd'hui



La convergence Indo-Asiatique (in Avouac, 2007)

L'Himalaya est une chaîne formée par la convergence continue des continents indien et eurasiatique, depuis la résorption par subduction de l'océan téthysien sous l'Asie (la "collision" Inde-Asie a eu lieu il y a 50 à 55 Ma). Cette convergence continue aujourd'hui, absorbée par le raccourcissement et l'épaississement en Himalaya et au Tibet. Une large partie est aussi absorbée par l'expulsion vers l'Est du bloc tibétain, comme le montre la carte des vitesses de déplacement actuelles mesurées au GPS (p.4, ci-contre).



Le réseau sismique permanent népalais, mis en place au début des années 1980, est de plus en plus étoffé (en parallèle à un réseau GPS). Il permet d'avoir une idée assez précise de la tectonique actuelle. La carte ci-contre (Pandey et al., 1999) montre l'ensemble des séismes enregistrés de 1994 à 1998. La sismicité se localise surtout à l'aplomb de la Haute Chaîne (avec des mécanismes au foyer de type chevauchement), et le long des grabens tibétains orientés N-S (mécanismes au foyer de type faille normale). Par contre il y a très peu de séismes au front de la chaîne. Noter aussi une zone de gap sismique dans le Centre-Ouest du Népal. Ici les chevauchements apparaissent bloqués, et il y a risque de séisme de forte magnitude un jour.

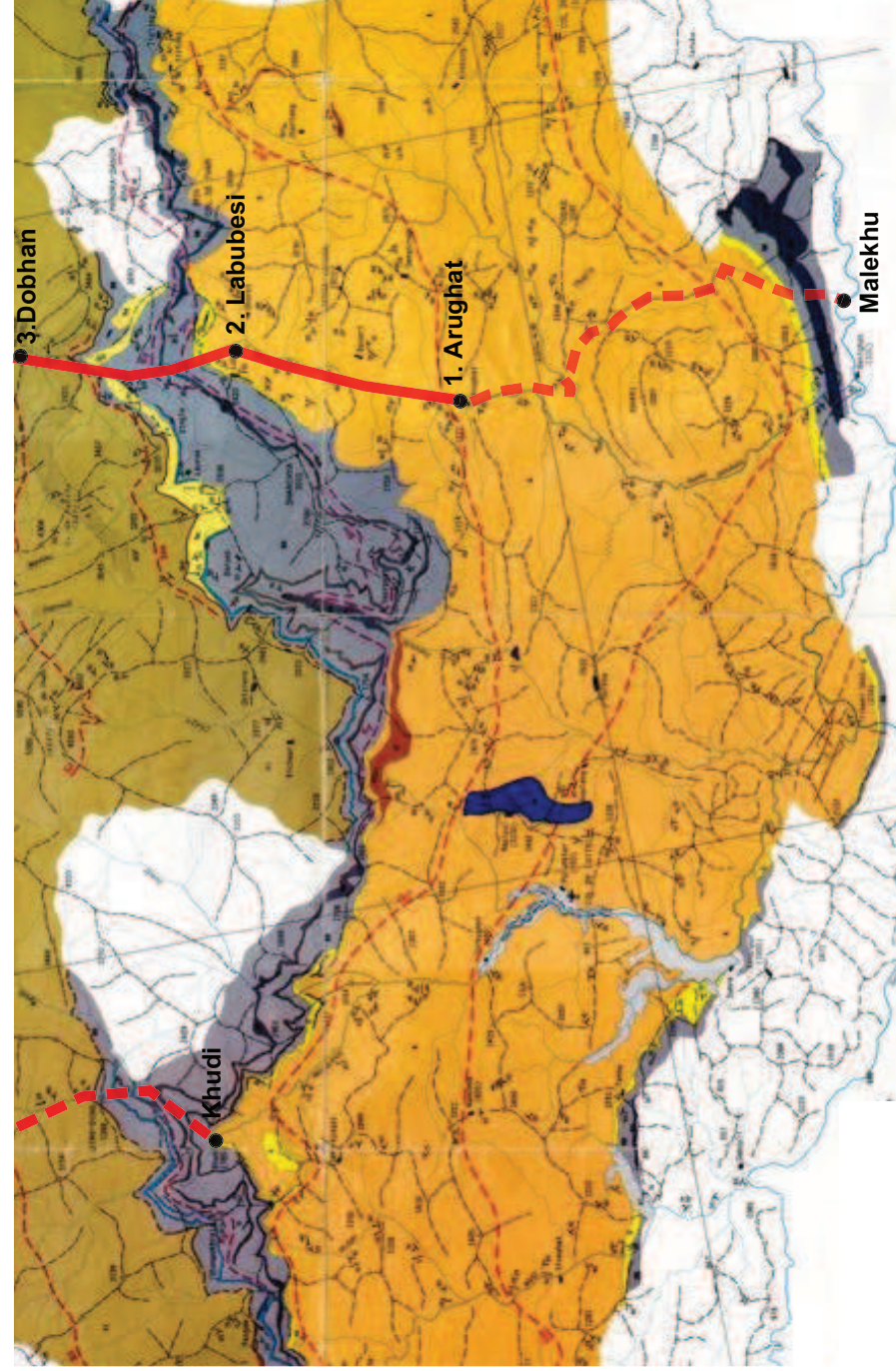
Ci-dessus (in Pandey et al., 1999) la coupe montre que la sismicité se localise sur le Grand Détachement Himalayen (MHT, Main Himalayan Thrust), au niveau d'une "rampe" située au front de la Haute Chaîne (densité maximum du nombre de ruptures sismiques, en violet : 2,7 événements/an/km²). C'est là que la surrection de la chaîne, mesurée par comparaison de nivellements anciens et récents, est maximum (plusieurs mm/an, fig. du haut, Jackson et Bilham, 1994, in Avouac 2007).

M. COLCHEN - P. LE FORT - A. PECHER
(1980)

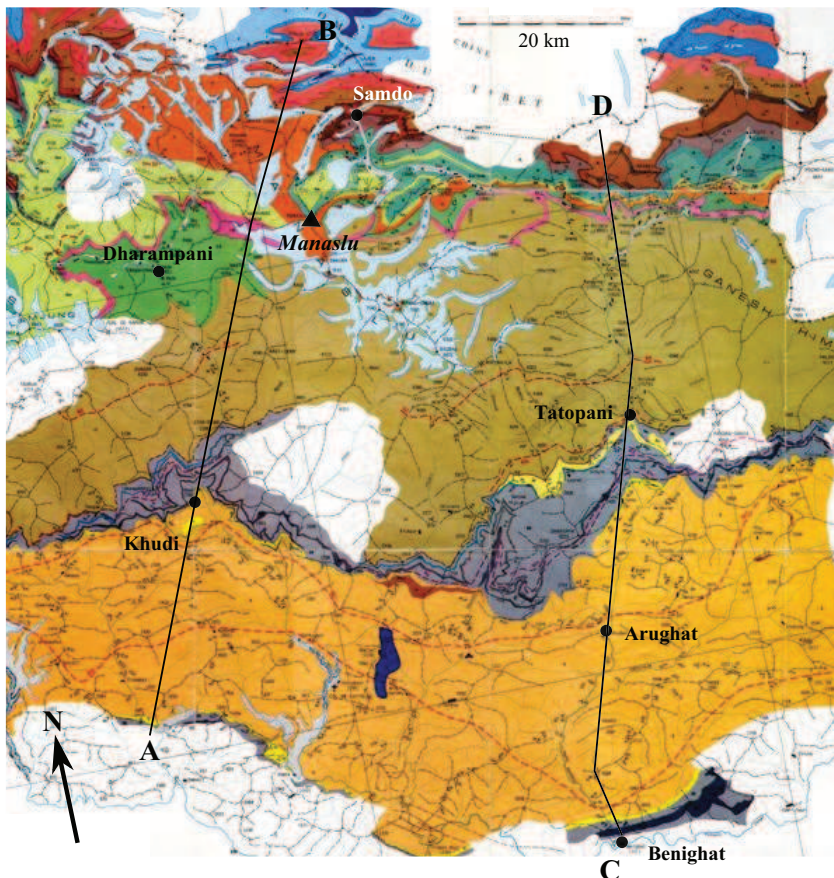


Carte géologique

Introduction - 5

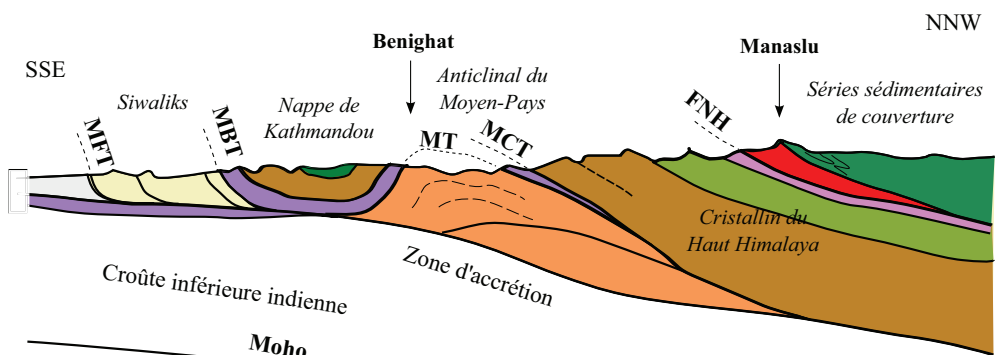


Extrait de la carte géologique du Népal Central (Colchen, Le Fort et Pêcher, 1980). Légende en fin de livret. Cette carte ancienne, qui reste le seul document global sur cette partie de la chaîne, comporte des lacunes. En particulier, ni la FNH (au dessus des gneiss ocellés de la Formation 3 du CHH, en rose), ni le MCT 1 (ou Muniari Thrust, au sommet des formations de Kunchha, en ocre) ne sont reportés.

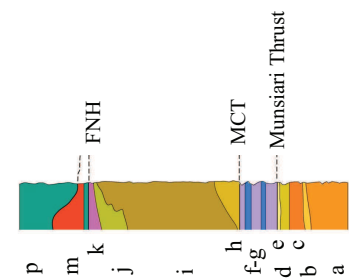
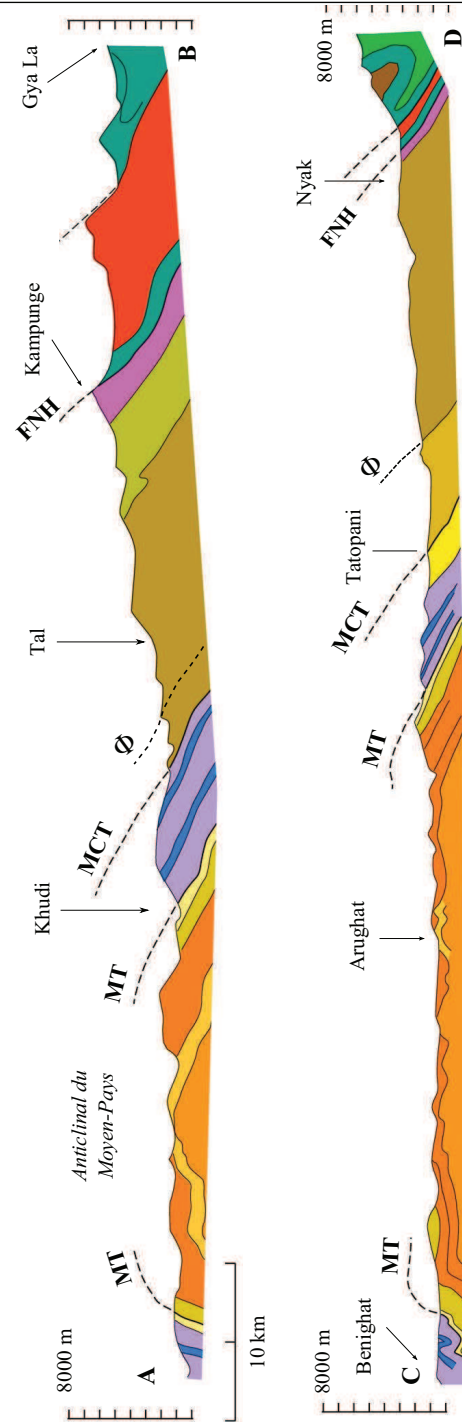


Localisation des coupes A-B et C-D de la page ci-contre

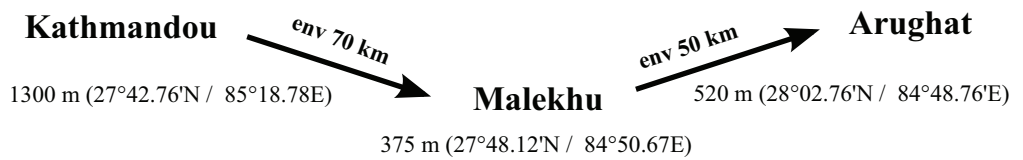
Une coupe à échelle de la croûte (d'après Bollinger et al., 2004)



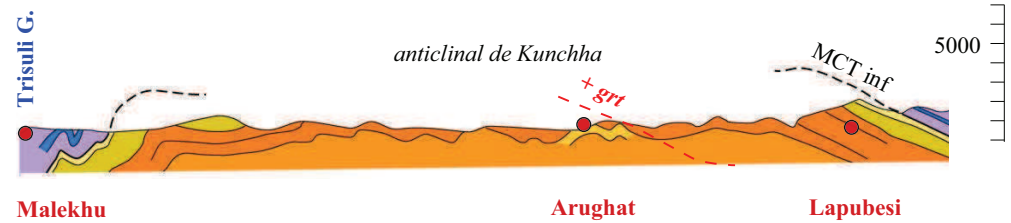
MFT (Main Frontal thrust) chevauchement frontal; **MBT** (Main Boundary Thrust), chevauchement bordier; **MT** (Munsiari Thrust) et **MCT** (Main Central Thrust), zone du chevauchement principal; **FNH**: Faille Nordt Himalayenne, ou zone de détachement Sud tibétaine.



Coupes de la Marsyandi (A-B) et de la Burhi Gandaki (C-D) - Distinctions litho-stratigraphique, du sommet de la pile tectonique à sa base :
Granite et Haut Himalaya sédimentaire : (m) granite du Manaslu, (p) Sédimentaire, essentiellement Paléozoïque
Cristallin du Haut Himalaya : (h) quartzites feldspathiques, (i) gneiss et migmatites, (j) gneiss à minéraux calcaïques, (k) gneiss ocellés de la Formation III
Moyen Himalaya supérieur : (f) schistes carbonatés et carbonés, (g) calcaires et dolomies
Moyen-Himalaya inférieur (formation de Kunchha) : (a) Kunchha grésoschisteux, (b) Kunchha quartzitique, (c) Kunchha très gréseux, (d) Kunchha schisteux, (e) quartzites.
 Le Munsiari Thrust (MT) et le MCT sont souvent nommés respectivement **MCT 1** et **MCT 2**



Thème :
*Nappes peu métamorphiques (chl-bio puis bio-grt) du Moyen-Pays inférieur (nappe de Kathmandou, nappe de Nawakot) . Grès et schistes de Kunchha (Protérozoïque).
 Anticlinal du Moyen-Pays*



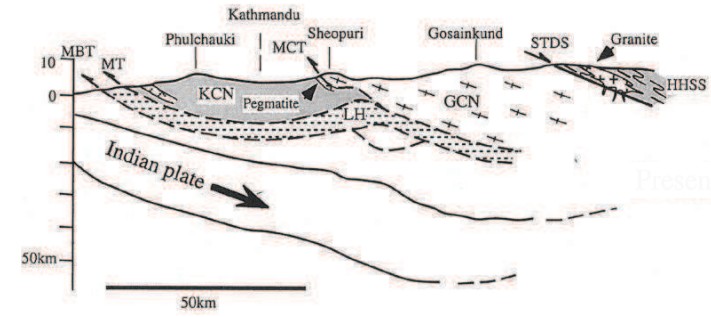
Journée en bus, d'abord sur la grande route Katmandu - Pokhra (principale route vers l'Inde, très encombrée !), que l'on quitte à Malekhu, peu à l'Est du confluent Trisuli Gandaki - Burhi Gandaki, pour la petite route de Dhading, puis la piste d'Arughat.

La vallée très urbanisée de Kathmandou correspond à un ancien remplissage lacustre. A partir du petit col par lequel on quitte à l'W la vallée, on descend un affluent RG de la Trisuli Gandaki, puis la Trisuli elle-même (une des grandes rivières qui recouperont comme la Burhi Gandaki toute la haute chaîne himalayenne). Dans toute cette descente vers l'Ouest, la route suit un synclinal où affleurent surtout des gneiss : ce sont les formations de la nappe de Kathmandou, nappe cristalline surmontant la nappe moins métamorphique de Nawakot.

En dessous de la nappe de Kathmandou, on passe en effet aux formations carbonatées et grésopélitiques de la nappe de Nawakot ("Formations du Moyen pays"), replissées en une grande voûte anticlinale, l'anticlinal de Kunchha. A partir de Malekhu, on abandonne la Trisuli (qui continue sur quelques km son parcours E-W) pour recouper transversalement cet anticlinal.

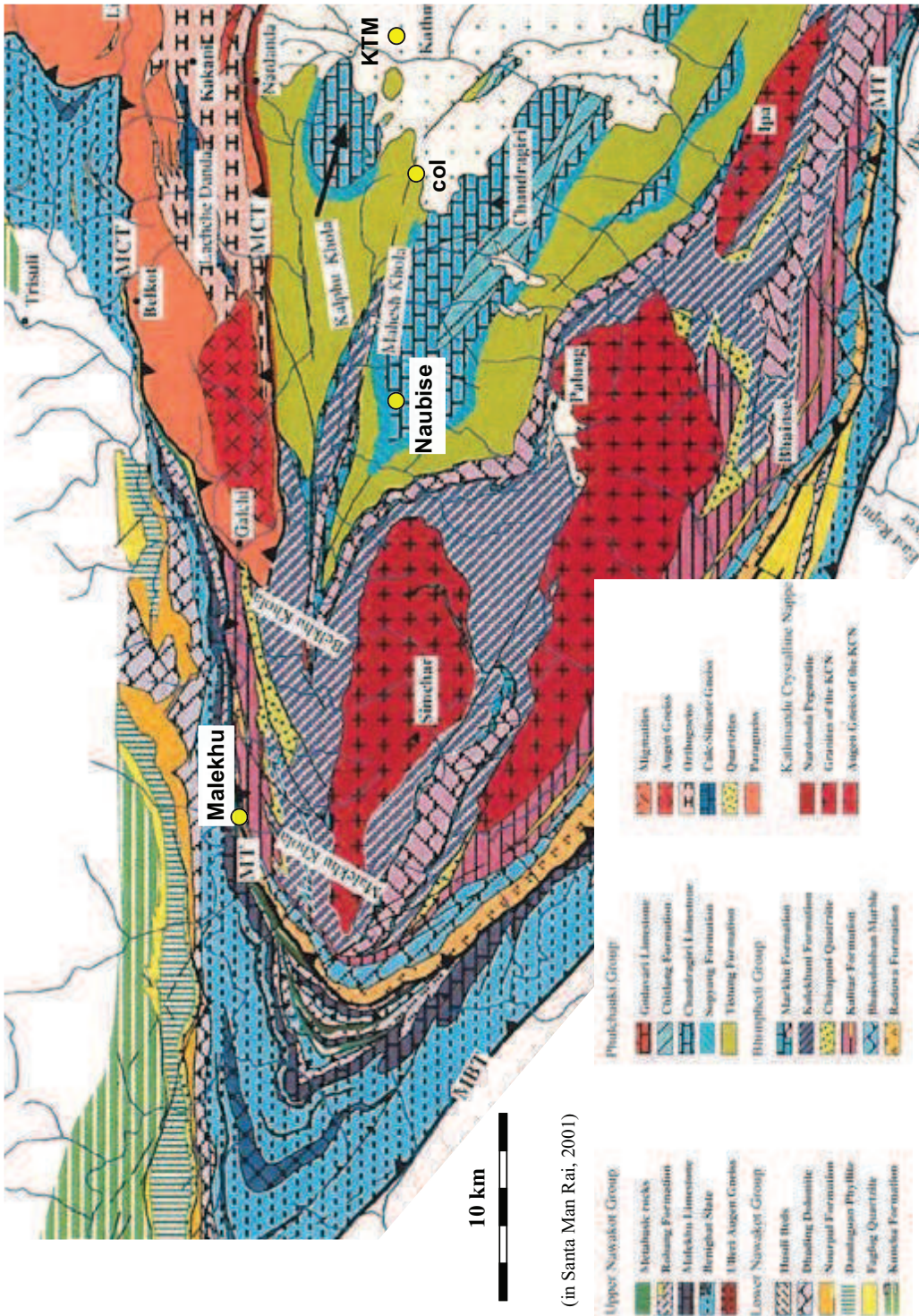
Compléments sur la nappe de Kathmandou

La nappe de Kathmandou comprend un soubassement de gneiss, envahi par des granites Cambro-Ordoviciens (480-500 Ma), et une couverture sédimentaire Paleozoïque. Enracinée au Nord de Kathmandou dans la zone du MCT, entre le Cristallin du Haut Himalaya et les Formations du Moyen Himalaya (nappe de Nawakhot), la nappe dessine un grand synclinal. La route suit le flanc N de ce synclinal (gneiss plus ou moins métamorphiques très redressés).

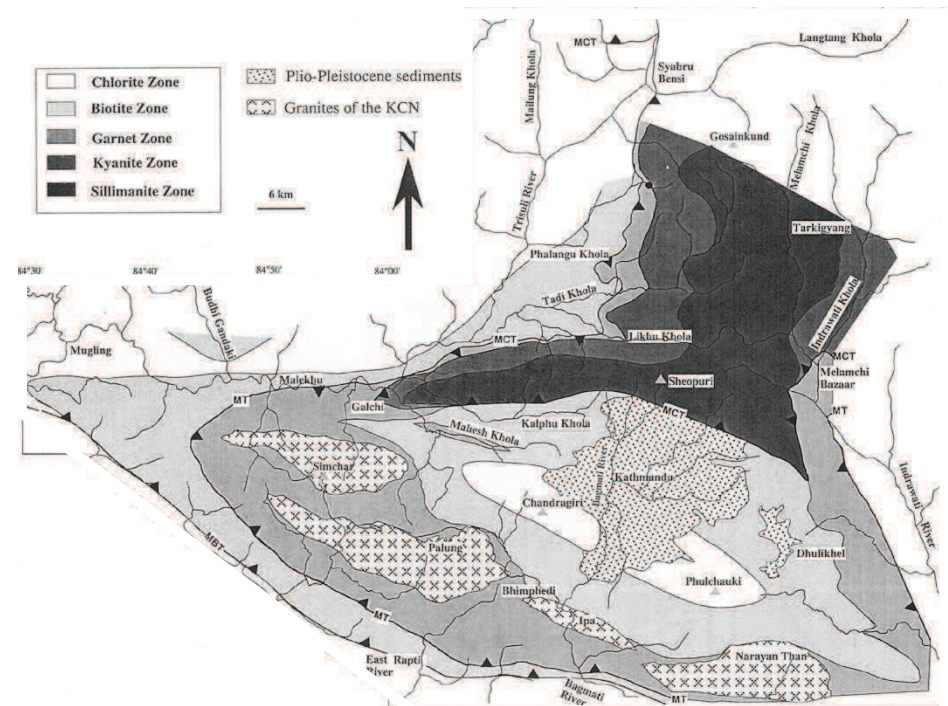


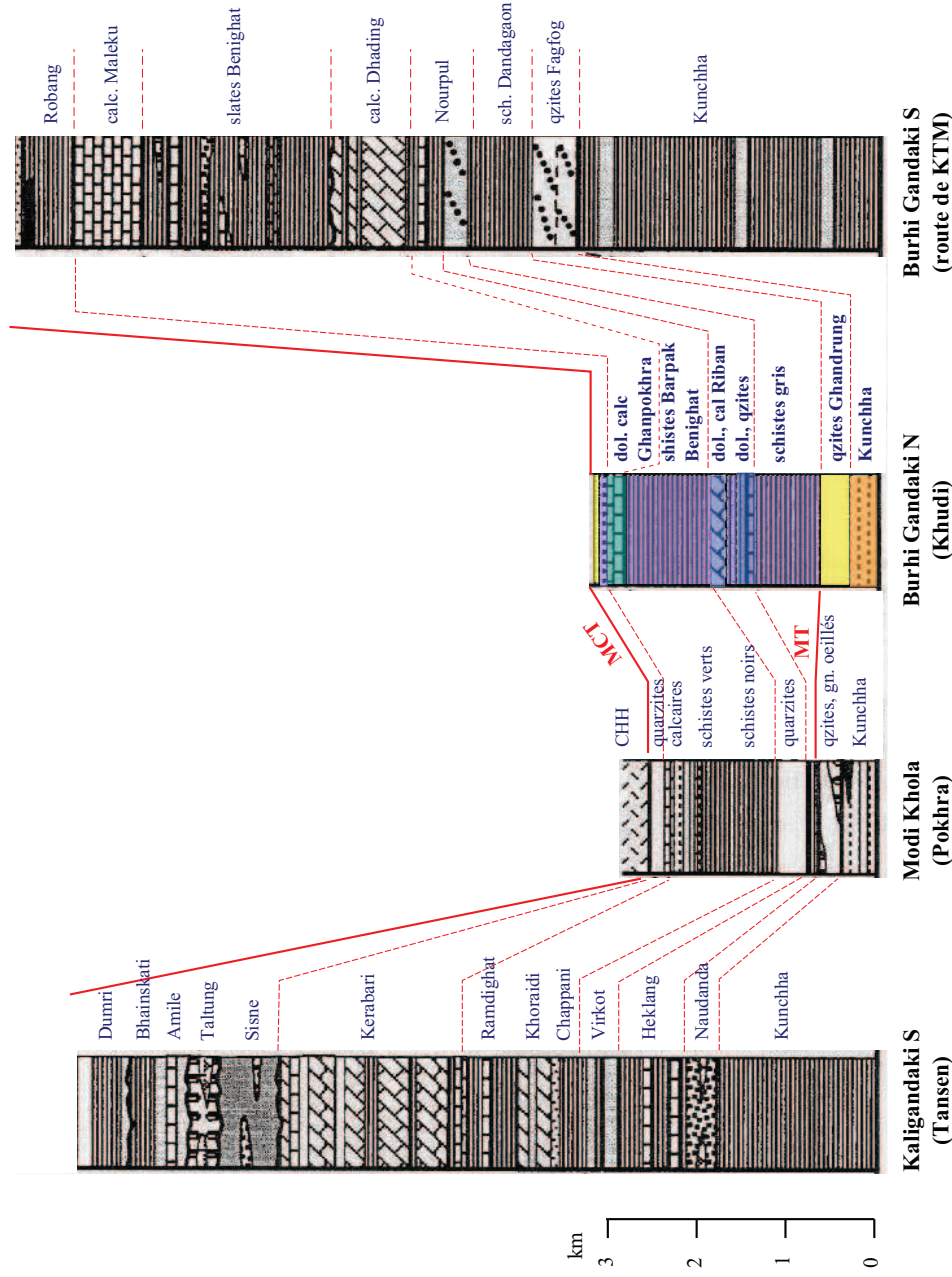
En haut, coupe de la Nappe de Kathmandou

En bas, carte métamorphique : le cristallin de la nappe est beaucoup moins épais que le Cristallin du Haut Himalaya. Le gradient métamorphique est fort, mais il y a passage continu du cristallin à sa couverture sédimentaire (in : Santa Man Rai, 2001)



(in Santa Man Rai, 2001)





La lithostratigraphie du Moyen Himalaya est assez variable et reste parfois imprécise, faute de niveaux repères suffisamment caractéristiques et constants pour être admis par l'ensemble des auteurs et partout ; en outre, ces séries sont quasi-dépourvues de fossiles et très mal datées ; enfin, on les trouve soit non métamorphiques et peu déformées au Sud de l'anticlinal de Kunchha, loin du MCT, soit métamorphosées et très déformées au Nord de l'anticlinal, dans la zone du MCT. Il en résulte une lithostratigraphie assez confuse, où les formations sont désignées faute de mieux par pléthora de noms locaux.

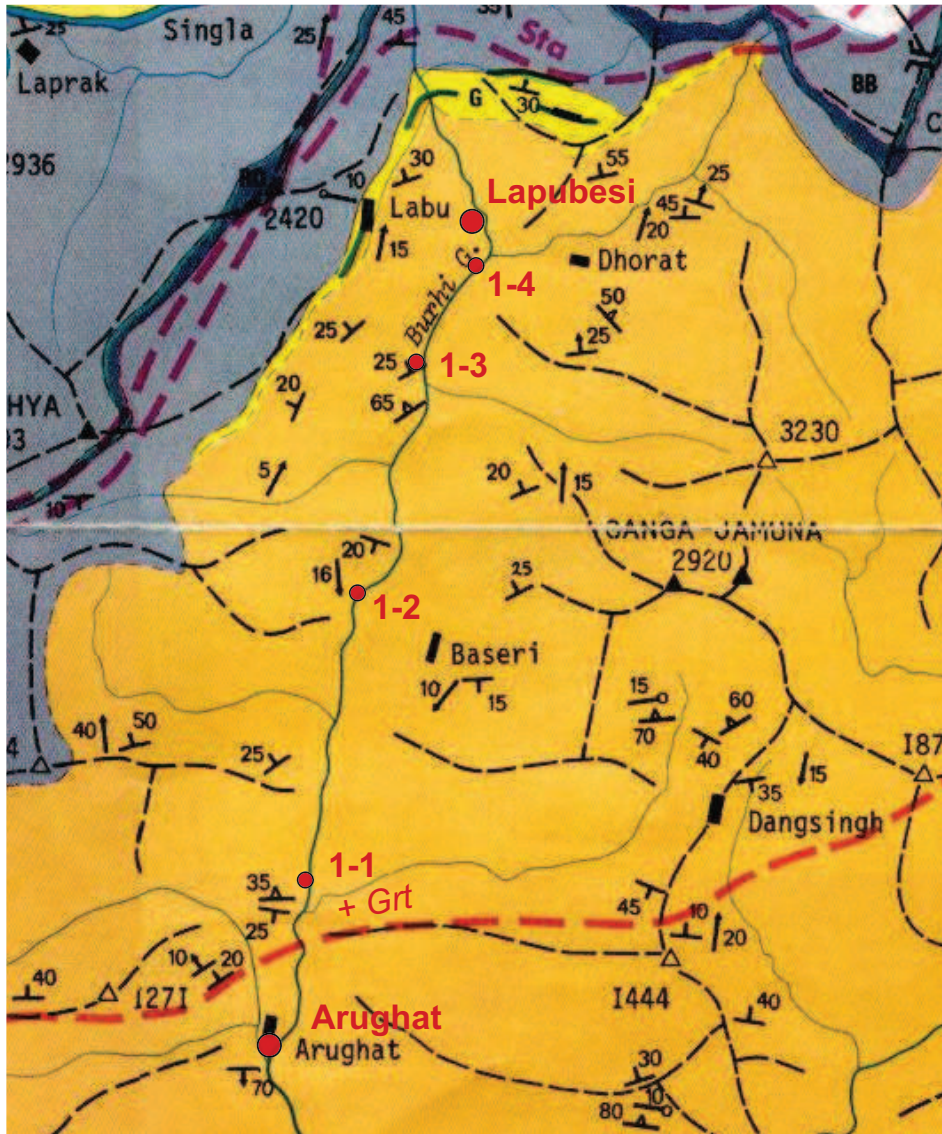
Néanmoins, dans tout le Népal Central, on peut séparer deux grands ensembles lithologiques :

- un ensemble détritico inférieure épais (plusieurs km), fait à 95% de grès et schistes protérozoïques, où s'intercalent quelques lentilles amphiboliques (des metabasites à chimisme tholéitique), et près du haut de la pile, au Nord de l'axe de l'anticlinal de Kunchha, un grand sill/laccolithe discontinu de granite porphyroïde (daté à env. 1850 Ma) transformé en orthogneiss (gneiss oeilés d'Ulteri, qui n'affleurent pas en Burhi Gandaki). A la base de cette série existe aussi un petit massif de syénites néphéliniques non datées, qui n'affleurent que dans la région d'Ampipal, un peu à l'Ouest d'Arughat.

- un ensemble supérieur plus varié, où abondent les schistes carbonés et les niveaux dolomitiques ou calcaires, très mal datés au Népal (seuls les calcaires de Dhading ont été datés du Cambrien par fossiles), mais qui par analogie avec le reste de l'Himalaya, irait du Protérozoïque supérieur jusqu'au Permo-Carbonifère gondwanien. La série est probablement très lacunaire, avec une discontinuité importante entre le Cambrien supérieur et le Carbonifère.

Au Népal Central, ces deux ensembles sont en continuité stratigraphique au Sud de l'anticlinal de Kunchha. Par contre au Nord, ils seraient séparés par un chevauchement important, que certains auteurs considèrent comme le MCT principal (équivalent du Munthali Thrust défini au Garhwal).

La figure ci-dessus (adaptée de Upreti, 1999) montre les séries du Moyen Pays supérieur au niveau de deux transects au Népal central : au niveau des Annapurmas (Kali Gandaki au Sud de l'anticlinal de Kunchha, Modi Khola au Nord) et au niveau du Manaslu (Burhi Gandaki Sud et Nord). La coupe que nous verrons est colorée dans des teintes voisines de celles de la carte géologique de Colchen et al., 1980.

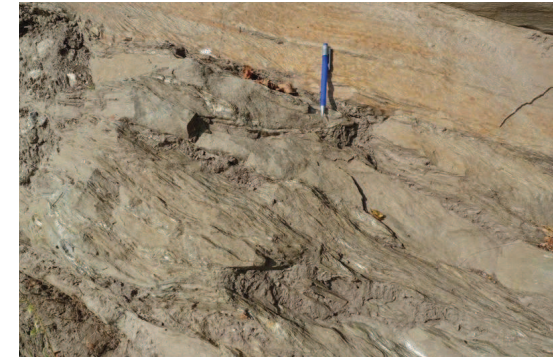


Extrait de la carte géologique du Népal Central (Colchen et al., 1978) - Légende : voir annexe (page 108 à la fin du livret-guide. Dans les teintes jaunes : la formation de Kunchha ; en violet et bleu, les formations du Moyen Pays supérieur. Le MCT 1 (MCT inférieur), au sommet de Kunchha, n'est pas reporté sur cette carte. Il passe peu au N de Lapubesi

1-1 (28° 04.49N / 84°49.50'E / 514m)

Bien que la série grésopélimitique de Kunchha semble n'avoir ici qu'une très faible empreinte métamorphique, on trouve dans les niveaux schisteux du grenat, qui n'existait pas au niveau d'Arughat : on a passé l'isograde + grt (cf carte géol et annexe 1, p. 104).

Tectonique : kinks conjugués tardifs, liés à l'anticlinal de Kunchha. Schistosité oblique sur la stratification (Ph 1-1), forte linéation d'étirement (marque la direction de transport des nappes)



Ph 1-1

1-2 près de Dharapani (28°06.82'N / 84°50.49'E / 615 m).

Kunchha très schisteux, à petits grenats. Plis tardifs, post-schistosité.

1-3 N de la Soti khola (28°09.28N / 84°51.97'E / 690 m).

Kunchha très schisteux, à chloritoïde. Plis à déversement Sud.

1-4 (28°09.87' / 84°52.48' / env 700m)

En face du débouché de la Richet khola, intercalations assez fréquentes de niveaux verts : il s'agit de tufs volcaniques, transformés en schistes à épidote-amphibole (Ph 1-2).

Dans cette zone, également des niveaux carbonatés : cela pose le problème de la limite des formations du MP supérieur (MCT 2) et de la signification du Munsiri Thrust (MCT 1).

Tectonique : schistosité tardive S3 déversée Sud (à pendage N), liée à l'anticlinal de Kunchha (cf photo : elle est parallèle au marqueur)

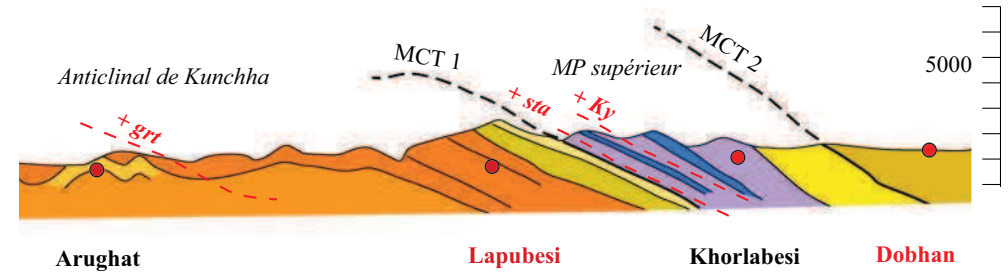


Ph 1-2



Lapubesi $28^{\circ}10.67'N / 84^{\circ}52.74'E$ 795 m
Dobhan $28^{\circ}17.70'N / 84^{\circ}54.32'E$ 1070 m
 env 9 km \nearrow
 dénivelée montée : 650 m

Thème : Nappe métamorphique (bio-grt) du Moyen-Pays supérieur, la zone de cisaillement du MCT. Il faudra traquer les minéraux de métamorphisme (Grt, Ky, Sta) et les figures de cisaillement.



2-1 2 km en amont de Lapubesi, après la Naudi khola ($28^{\circ}11.77' / 84^{\circ}52.52' / 787$ m)
 Schistes massifs de Kunchha, à lentilles de quartz symmétamorphiques, reprises par des cisaillements "haut vers le Sud".

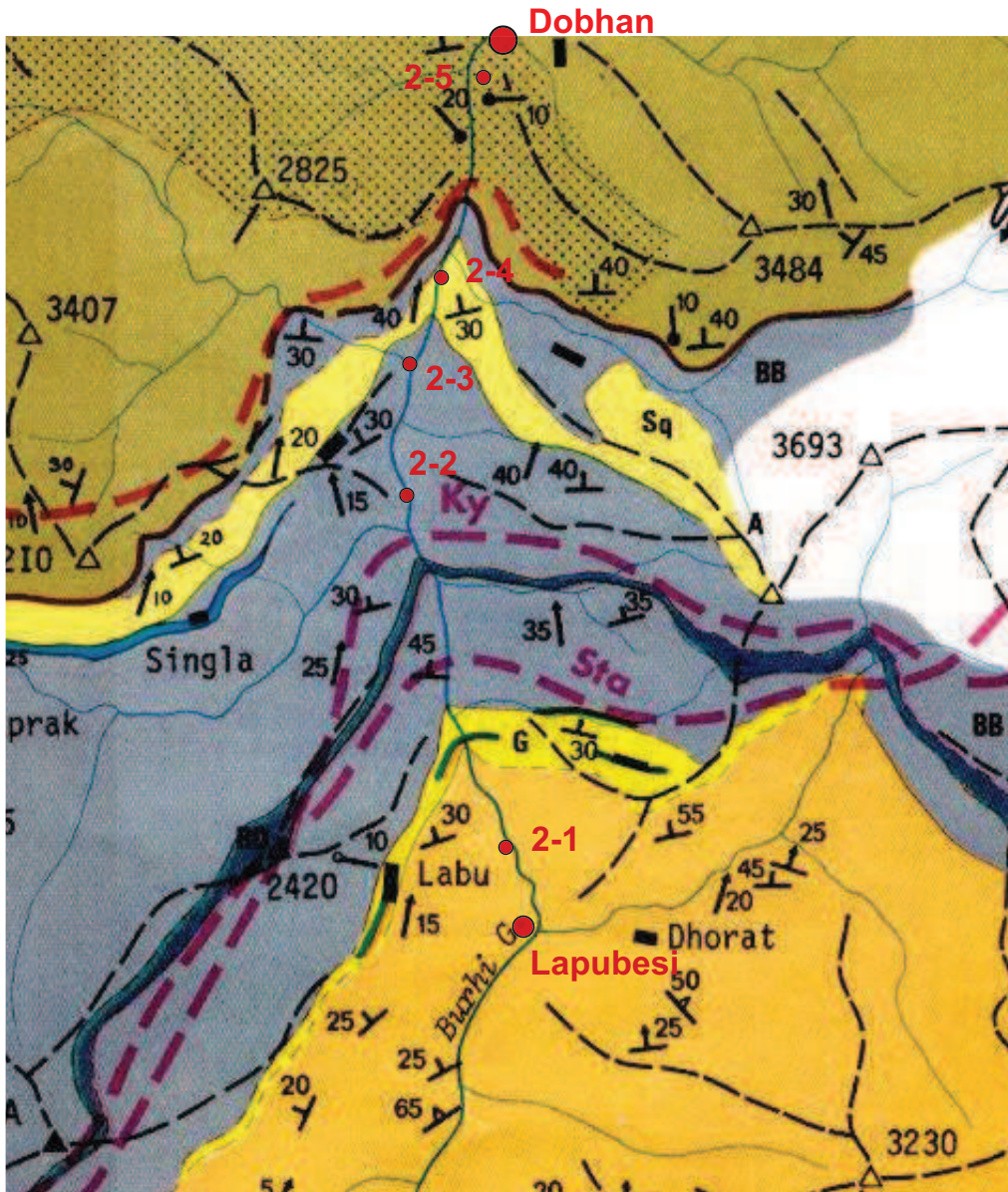
On domine ici le début d'une zone où la pente de la Burhi est moins forte. Elle coule dans une petite plaine alluviale, formée derrière un écroulement de la RD ayant barré la vallée. On rejoint cette plaine peu au N ($28^{\circ}11.00' / 84^{\circ}52.49' / 790$ m)



A partir de l'extrémité de cette petite plaine, le chemin est dominé par des barres de formations schisteuses et carbonatées très déformées et plus métamorphiques, qui appartiennent au "Moyen Pays supérieur". On entre dans la zone de grands chevauchements (MCT 1, MCT 2) qui permettent au Cristallin du Haut Himalaya (roches profondes) de remonter au dessus des nappes du Moyen Himalaya.



Le MCT 2 (le chevauchement principal du Haut Himalaya sur le Bas Himalaya) en Burhi Gandaki (env. $28^{\circ}16.52' / 84^{\circ}53.92' / 925$ m). Source chaude, avec de nombreux encroûtements calcaires (travertins)



5 km



Ph 2-2

2-2 ($28^{\circ}14.51' / 84^{\circ}52.67' / \text{env } 840 \text{ m}$) Alternances de niveaux grés-carbonatés et de "calcaires pustuleux". Figures de déformation cisailante "haut vers le Sud", associées au MCT : plis d'entraînement, parfois recoupés par la schistosité.

2-3 Au débouché de la Namrung khola, juste à côté du camp de Khorlabesi ($28^{\circ}15.22' / 84^{\circ}52.93' / 845 \text{ m}$). Les blocs du torrent donnent un aperçu des roches qui forment la zone du MCT : gneiss et schistes à bio-grt (ph 2-3a), parfois disthène et staurotide, et aussi des blocs d'amphibolite à gros grenat (ph 2-3b).



Ph 2-3a



Ph 2-3b

2-4 1,5 km au N de Khorlabesi ($28^{\circ}15.64' / 84^{\circ}53.40' / 841 \text{ m}$): quartzites peu en dessous du MCT 2, à structure "en tuyau", où la linéation d'étirement prédomine sur le plan d'aplatissement. Une structure fréquente dans les grandes zones de cisaillement ductile. Nous couperons le MCT proprement dit un peu plus au N, à Tatopani. Mettant en contact des quartzites sur d'autres quartzites, il ne se marque par aucun contraste lithologique, mais seulement par une source chaude.



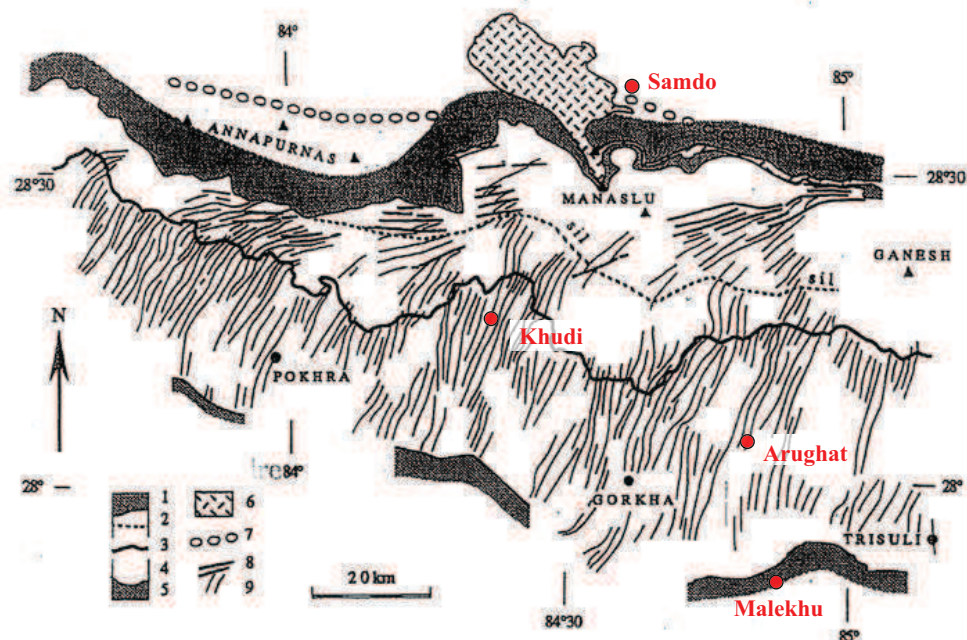
2-5 (env $28^{\circ}17.51' / 84^{\circ}54.19' / 920 \text{ m}$) De beaux affleurements dans les faciès très quartzitiques de la base du CHH. Ici, des "gneiss en plaquettes" : quartzites feldspathiques.

Structure dans la zone du MCT

Entre le Haut Himalaya très métamorphique et les nappes moins métamorphiques du Moyen Himalaya, il n'y a pas un chevauchement unique bien défini, mais toute une zone de cisaillement intense et hétérogène. Le MCT 2 est la limite lithologique entre Haut et Moyen Himalaya ; c'est aussi là que le cisaillement est le plus fort. Mais la déformation de part et d'autre est très hétérogène, et on peut définir sans doute au moins un autre MCT (le MCT 1, équivalent du Munsiri Thrust du Kumaon) entre le Moyen Pays supérieur carbonaté et le Moyen Pays inférieur terrigène. Le MP sup formerait une nappe indépendante, rappelant la nappe d'Almora, pincée sous le Cristallin du Haut Himalaya (cf coupes p. 11). La nappe de Kathmandou, bien que dans une position structurale analogue, est plus ambiguë. Une autre zone de cisaillement intense a été reconnue en 2011 dans le Cristallin du Haut Himalaya, au dessus du MCT 2 : un MCT 3 ?

Dans cette zone du MCT, trois marqueurs tectoniques principaux : la **schistosité** (plan d'aplatissement), souvent associée au **plan de cisaillement** dans des amygdales typiques "C-S"; enfin la **linéation d'étirement LX**, quasi parallèle à la direction de transport, et de ce fait souvent utilisée comme marqueur de la direction de déplacement.

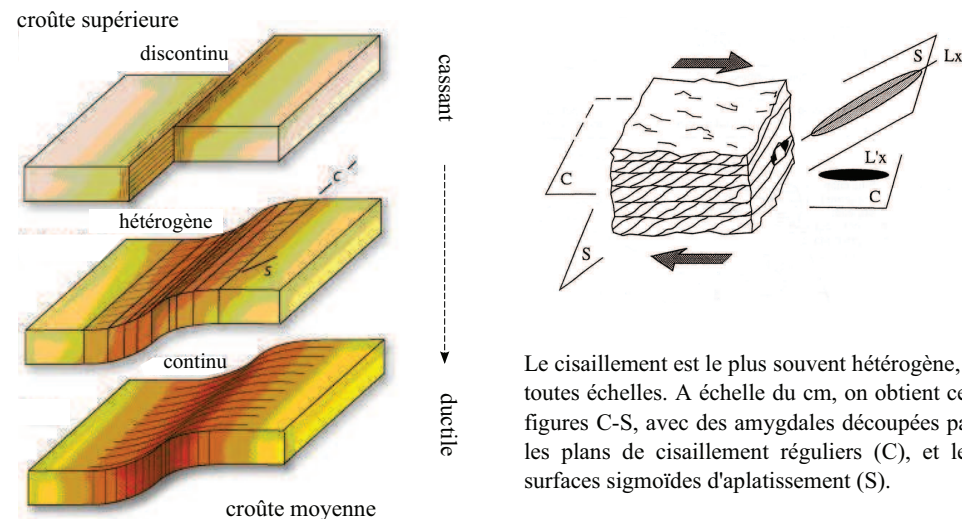
Le sens de cisaillement (en général haut vers le Sud) est donné par la "dissymétrie" des fabriques tectoniques, figures toujours "monocliniques" (1 seul axe de symétrie, d'ordre 2).



1 : Couverture sédimentaire du CHH, au dessus de la Faille Nord Himalayenne - 2 : Limite Sud de la sillimanite - 3 : MCT principal (MCT 2) - 4 : Moyen-Pays inférieur, grès et schistes de Kunchha - 5 : Couverture carbonatée, retombée Sud de l'anticlinal du Moyen-Pays - 6 : Granite du Manaslu - 7 : Axe du pli des Annapurnas - 8 : Linéation d'étirement LX.

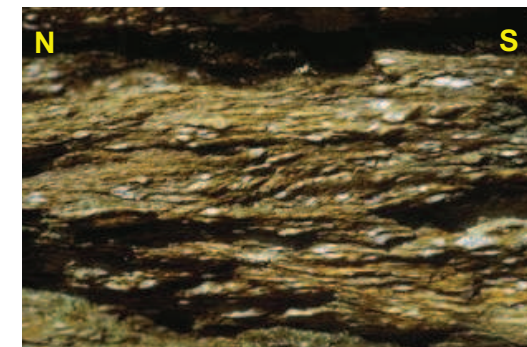
Carte de la trace de la linéation d'étirement au Népal Central. Noter la largeur de la zone d'influence du MCT, avec un étirement bien exprimé et de direction très constante (env. N20° E) dans tout le Moyen-Himalaya.

Structure dans la zone du MCT

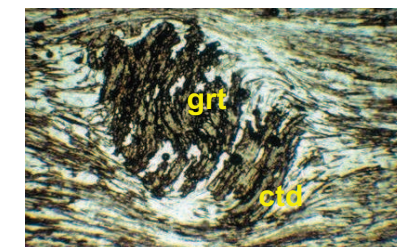


Le cisaillement est le plus souvent hétérogène, à toutes échelles. A échelle du cm, on obtient ces figures C-S, avec des amygdales découpées par les plans de cisaillement réguliers (C), et les surfaces sigmoïdes d'aplatissement (S).

Ci-contre, des amygdales C-S dans les "gneiss ocellés d'Ulleri", ancien granite protérozoïque (env. 1850 Ma), intrusif en lame au sommet des formations de Kunchha, déformé à l'Himalayen dans la zone du MCT (cliché pris dans la zone des Annapurnas, à l'Ouest de notre coupe; en Marsyandi et en Burhi, ces granites n'affleurent pas). Taille de l'affleurement : env. 1 m.



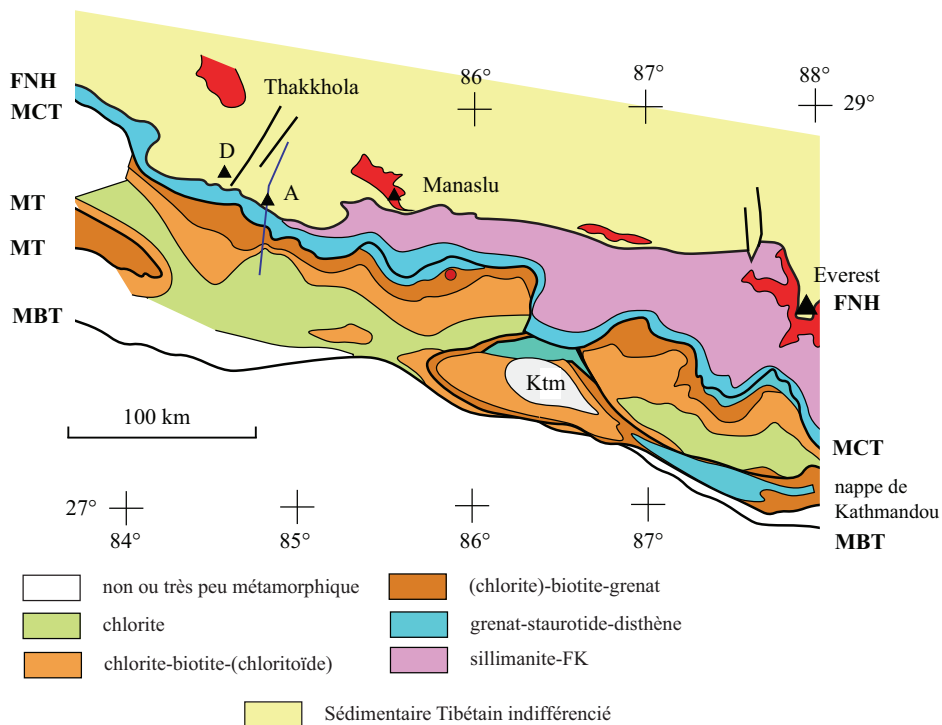
Ci-dessous, : la linéation d'étirement LX, ici marquée par l'étirement des feldpaths dans les gneiss d'Ulleri (même affleurement que le précédent)



Les figures "dissymétriques" de cisaillement s'observent à toute échelle : ci-dessus, en lame-mince dans un échantillon proche du MCT 1, grenat (grt) et chloritoïde (ctd) syn-cinématiques (ayant grossi pendant le cisaillement)

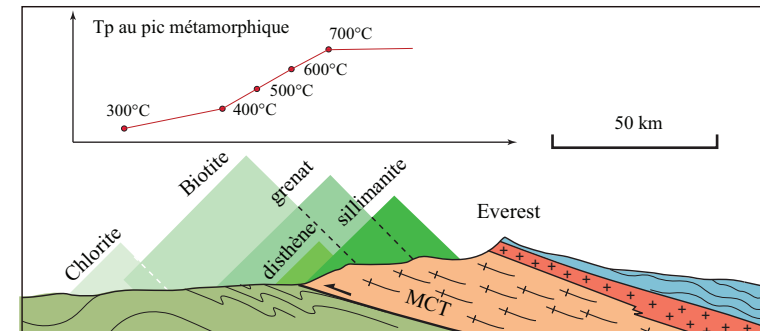
Métamorphisme dans la zone du MCT

La zone du MCT n'est pas seulement marquée par des structures de cisaillement omniprésentes, mais aussi par un dispositif métamorphique très particulier, le fameux **métamorphisme inverse** himalayen: en remontant la Burhi, nous sommes partis dans les formations de Kunchha peu métamorphiques (schiste vert), puis rapidement la biotite, puis le grenat sont apparus. Peu au Nord de Labu, le staurotide puis le disthène apparaissent à leur tour. Enfin nous verrons que la sillimanite (qui marque un métamorphisme de haute température) est très abondante dans les gneiss du Haut Himalaya. Si on tient compte du fait que dans toute cette partie de la coupe, nous remontons dans la série (fig. ci-contre), on voit qu'il y a augmentation du métamorphisme du bas vers le haut de la pile tectonique, un phénomène un peu paradoxal. Les mécanismes qui peuvent aboutir à cette géométrie sont encore débattus (effet d'une structure thermique transitoire, superposition d'unités de métamorphisme différent, ...), mais il y a un élément important à garder en tête : la corrélation cartographique nette (cf. carte ci-dessous) entre la zone du MCT et le métamorphisme inverse.

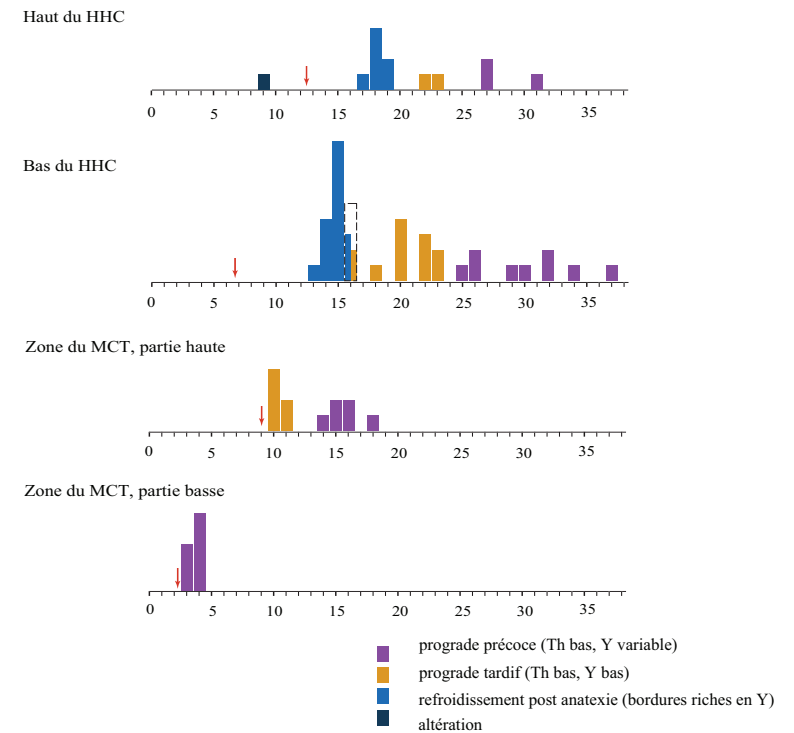


Ci contre : datation du métamorphisme en utilisant les ages U-Pb des monazites (coupe du Langtang, un peu à l'Est du Manaslu, données Khon et al., 2004) - Les monazites (phosphates de terres rares) ont été différenciées en monazites progrades (c'est à dire formées pendant la montée en température de la roche) et rétrogrades (formée pendant le retour de l'échantillon vers la surface) sur des critères microstructuraux et de composition chimique (teneurs en Y et Th).

Métamorphisme dans la zone du MCT



Ci-dessus, une coupe illustrant le métamorphisme inverse: la transversale de l'Everest (in Avouac, 2007). Cette coupe est tout à fait analogue à celles de la Burhi ou de la Marsyandi (p 101)



- au dessus du MCT, on enregistre d'abord une évolution prograde, depuis 35 Ma jusque vers 20-23 Ma, moment du maximum thermique, puis l'évolution rétrograde ultérieure.
 - en dessous du MCT au contraire (les 2 histogrammes du bas), toutes les monazites sont progrades, comme les grenats auxquels elles sont associées. Le début du fonctionnement à chaud du MCT s'est ici produit vers 15 Ma.



5 km

Philim

1547 m (28°23.59'N / 84°53.77'E)

j3 (1)

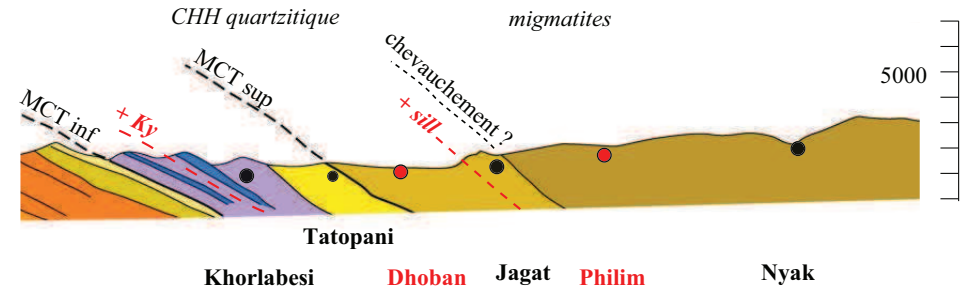


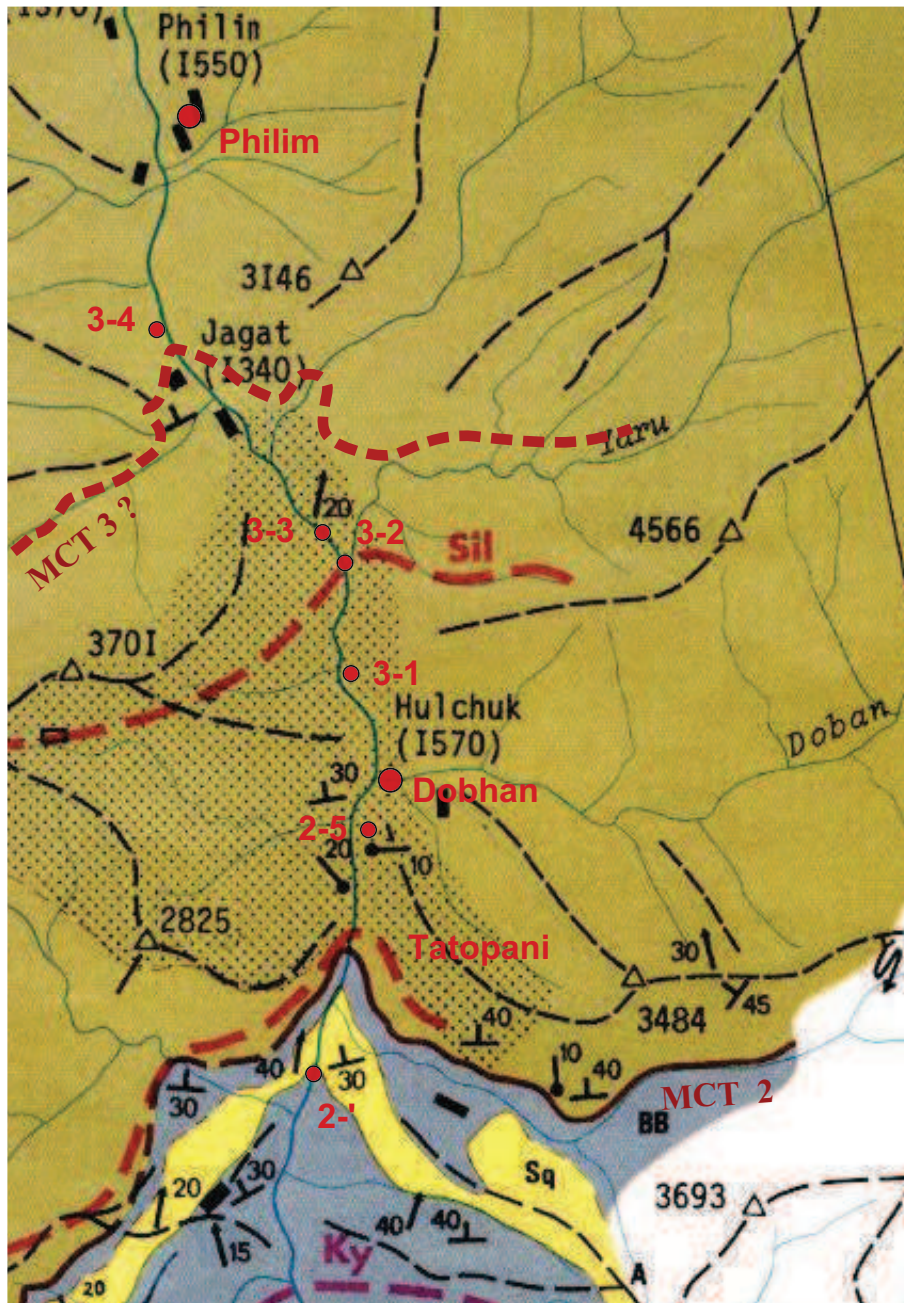
Dobhan

1070 m (28°17.70'N / 84°54.32'E)

dénivelée montée : 945 m

Thème : MCT - Base du Cristallin du Haut Himalaya





5 km

3-1 ($28^{\circ}18.71' / 84^{\circ}54.18' / 1083$ m) 2 km au N du point 2-5, toujours dans les quartzites feldspathiques, qui en Burhi Gandaki forment une zone très épaisse (une nappe indépendante entre le MCT 2 et un MCT 3 qui passerait au Nord de Jagat ?)



Quelques niveaux plus schisteux (ph ci-contre) permettent d'observer des débuts de migmatitisation. Une migmatite est une roche qui garde les traces d'un début de fusion, avec séparation entre des "mobilisats" leucocrates de composition granitique et des "restites" enrichies en minéraux ferro-magnésiens (parties surbiotiques). Cette fusion partielle montre que le métamorphisme a atteint ici des températures très élevées (Tp atteintes : plus de 650°C)

3-2 Au N de la Yaru khola ($28^{\circ}19.91' / 84^{\circ}54.38' / 1250$ m) Quartzites très massifs, très métamorphiques (zone à sillimanite), mais montrant des figures qui évoquent des stratifications entrecroisées (?).



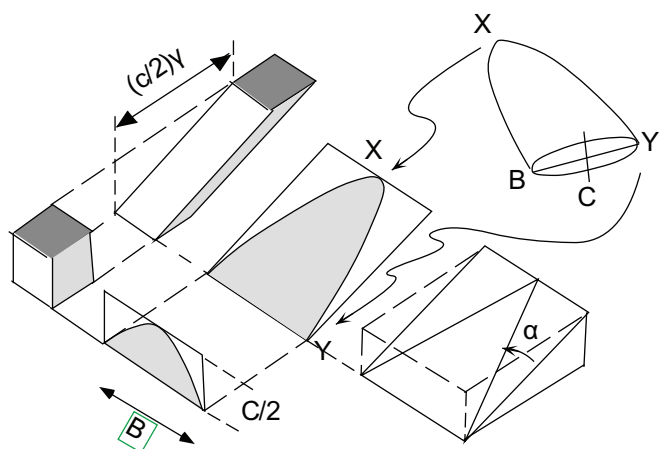
3-5 ($28^{\circ}20.24' / 84^{\circ}54.13' / 1250$ m) Sur une dalle du chemin (ph ci-contre), on voit très bien une linéation d'intersection, marquant l'intersection entre le plan de schistosité (la surface de la dalle) et les alternances lithologiques (bandes de couleurs différentes). Quand la schistosité est associée à un pli, la linéation d'intersection est parallèle à l'axe du pli. On notera ici la forme onduleuse de cette linéation : les plis dans cette zone seraient des plis à axes courbes.



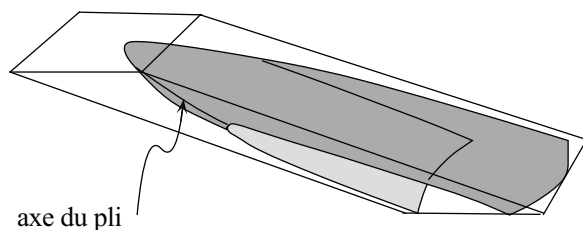
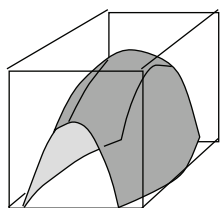


Ph 3-1c

Un des arguments pour faire passer une zone de chevauchement intra-CHH au Nord de Jagat est la présence dans les quartzites de plis en fourreau (en doigt de gant, ou autres noms évocateurs...). Dans ces plis, on voit nettement que l'axe du pli est parallélisé à l'étirement syn- à tardi-métamorphique (ci-contre, détail de la photo 3-4b : le grenat est nettement tronçonné, à la manière d'une belemnite étirée !)



De tels plis s'expliquent par amplification de l'obliquité initiale d'un axe de pli dans une zone de cisaillement. On sait en effet que dans le cisaillement, tout objet linéaire tend à tourner pour se rapprocher de la direction de cisaillement. Si l'axe initial du pli était légèrement irrégulier, et oblique de part et d'autre de la direction de cisaillement (comme sur la figure ci-contre), on obtient un pli à axe fortement courbé. Dans le cas contraire (axe du pli oblique d'un seul côté du cisaillement) le pli peut rester régulier, mais son orientation aura tourné vers la direction de cisaillement.



3-4 Sur le chemin de mousson, un peu au dessus du fond de la Burhi (28°21.78' / 84°53.24' / 1320 m) : toujours les gneiss en plaquettes, soit quartzitiques, soit à lits à minéraux calciques (Hb-Dio-Scap), ce qui évoque la "Formation II" (partie médiane du Cristallin du Haut Himalaya. Ici, de beaux plis synschisteux, dont la charnière est parallèle à la linéation d'étirement. Ceci implique du cisaillement fort. On peut se demander s'il ne passe pas juste au Nord de Jagat un grand chevauchement de type MCT (souligné par des zones à sulfures et dégagement d'H₂S, près de Jagat), mais interne au CHH, passé inaperçu lors des premiers travaux. Des travaux sont en cours (2012), pour voir s'il n'y a pas à ce niveau un hiatus dans les conditions et l'âge du métamorphisme.



Ph 3-4a : pli en fourreau dans les quartzites, section perpendiculaire à l'axe



Ph 3-4b : en section parallèle à l'axe (N20°E) : l'étirement marqué par le grenat est parallèle à la linéation d'intersection et à l'axe du pli (LB // LX).



5 km

Bihi

1927 m (28°30.17'N / 84°51.90'E)

j4 (1)

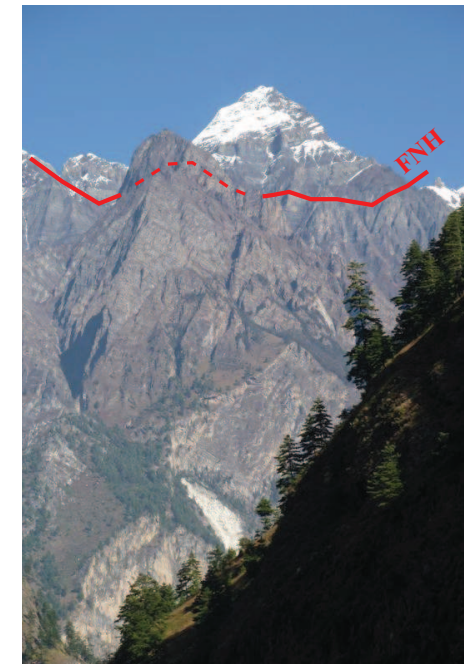
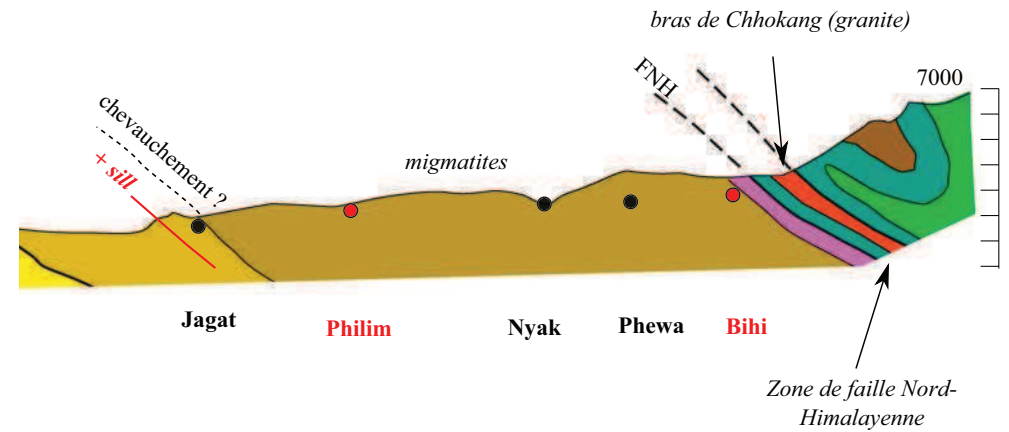
Philim

1574 m (28°23.59'N / 84°53.77'E)

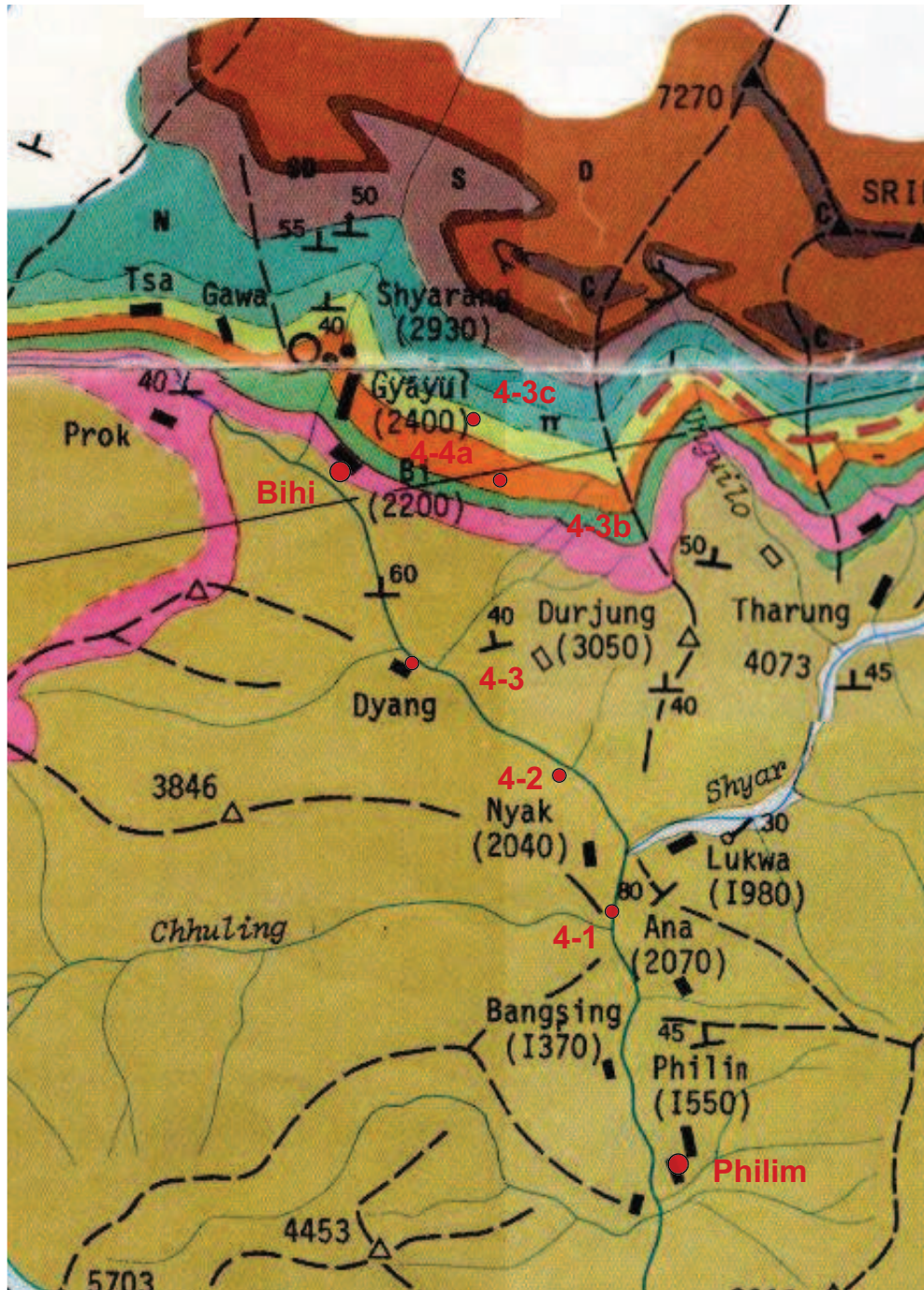
dénivelée montée : 980 m



Thème : partie supérieure du Cristallin du Haut Himalaya.

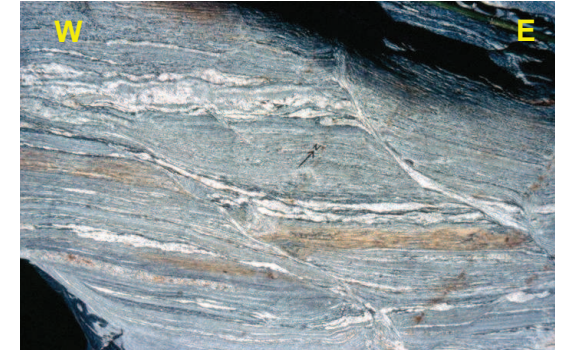


En amont de la Pewa khola, vue sur es falaises formant la partie supérieure du Cristallin du Haut Himalaya. Le sommet qui se détache sur le ciel est dans les formations sédimentaires paléozoïque. Entre sédimentaire et Cristallin du haut Himalaya, la zone de faille Nord Himalayenne (FNH, aussi appelée zone de détachement Sud Tibétaine, STDZ), une zone de détachement à géométrie de faille normale, marquée par une décroissance progressive mais très rapide du métamorphisme.



5 km

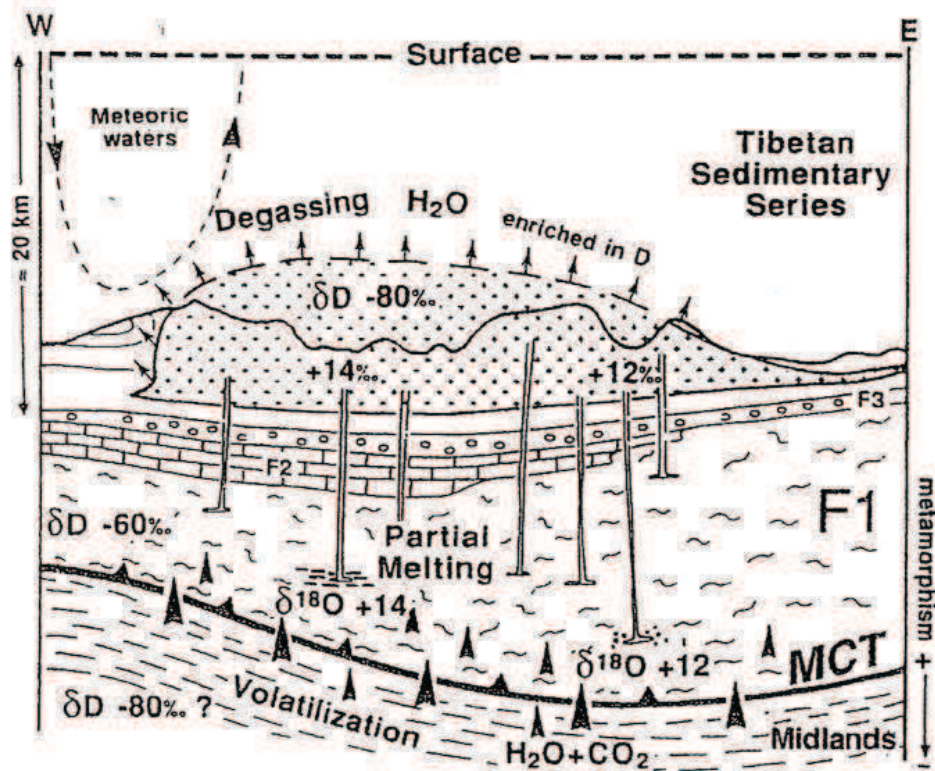
4-1 Rive droite de la Burhi, baume du pont de Nyak (env $28^{\circ}26.12' / 84^{\circ}53.88' / 1630$ m). Gneiss et migmatites à sillimanite. La sillimanite souligne des plans de cisaillement dextres (une des composantes de la Zone de Faille Nord Himalayenne ou Sud Tibétaine).



4-2 Entre Nyak et Dyang, on recoupe quelques très beaux affleurements de migmatite, en particulier ici ($28^{\circ}27.85' / 84^{\circ}52.79' / 1690$ m). Noter la ségrégation liée à la fusion partielle locale (lentilles granitiques blanches, bordées par un liseré de biotites = restites) et la tendance à l'échappement des mobilisats vers le haut, en suivant des plans de cassure virtuels.

4-3 ($28^{\circ}28.73' / 84^{\circ}52.03' / 1920$ m)

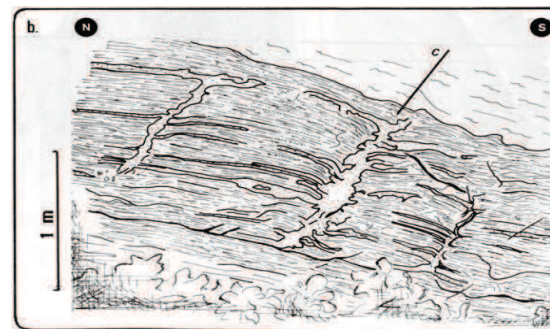
En arrivant à Dyang, un autre bel affleurement de migmatites



Coupe NW-SE (parallèle à la chaîne) au niveau du granite du Manaslu, qui forme une lentille allongée entre Marsyandi (à gauche) et Burhi Gandaki (à droite) (France-Lanord et al., 1988). Cette coupe schématisée illustre les rapports entre la fusion du Cristallin du Haut Himalaya et la formation des granites sus-jacents, tel le granite du Manaslu. Cette coupe interprétative s'appuie sur les données isotopiques de l'oxygène.

Le mécanisme invoqué : le métamorphisme prograde dans les formations du Moyen Pays (en dessous du MCT, et synchrone de son fonctionnement) fournit des volumes importants d'eau ; cette eau percole à travers le Haut Himalaya, où elle réhydrate les gneiss en entraînant leur fusion ; les liquides migmatitiques sont collectés et se bloquent à la base de la couverture sédimentaire, pour donner le laccolithe (la grosse lentille) de granite du Manaslu.

Si le lien entre migmatisation du Cristallin du Haut Himalaya et formation du granite est toujours admis, et conforté par les données géochronologiques et géochimiques (ci-contre), ce schéma butte sur la géométrie réelle : la zone de FNH sépare le granite des formations sous-jacentes, avec un déplacement fort (sans doute quelques dizaines de km). Ce ne sont pas les migmatites directement à l'aplomb du granite qui l'alimentent, mais la fusion dans des domaines qui étaient plus frontaux (?), et si tel est le cas maintenant érodés, du Cristallin du Haut Himalaya.



Affleurement en Marsyandi, an amont de Tal (M. Brouand, 1989)

En Burhi Gandaki (ph. SG)

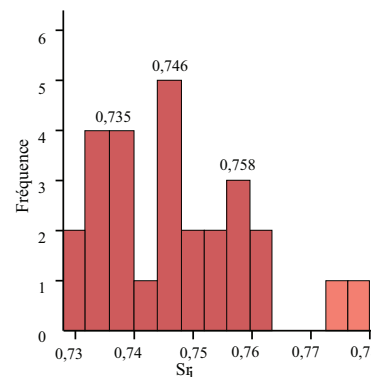


En Burhi comme en Marsyandi, nous pourrions observer des mobilisats granitiques collectés dans des fentes d'extension transverses à la foliation : ces figures suggèrent que la migmatisation s'est faite jusque tardivement dans l'histoire métamorphique, peut-être en contexte d'extension. Les liquides granitiques ont migré via ces collecteurs (parfois de vrais filons) vers le haut de la pile métamorphique, où ils auraient alimenté le futur granite du Manaslu.

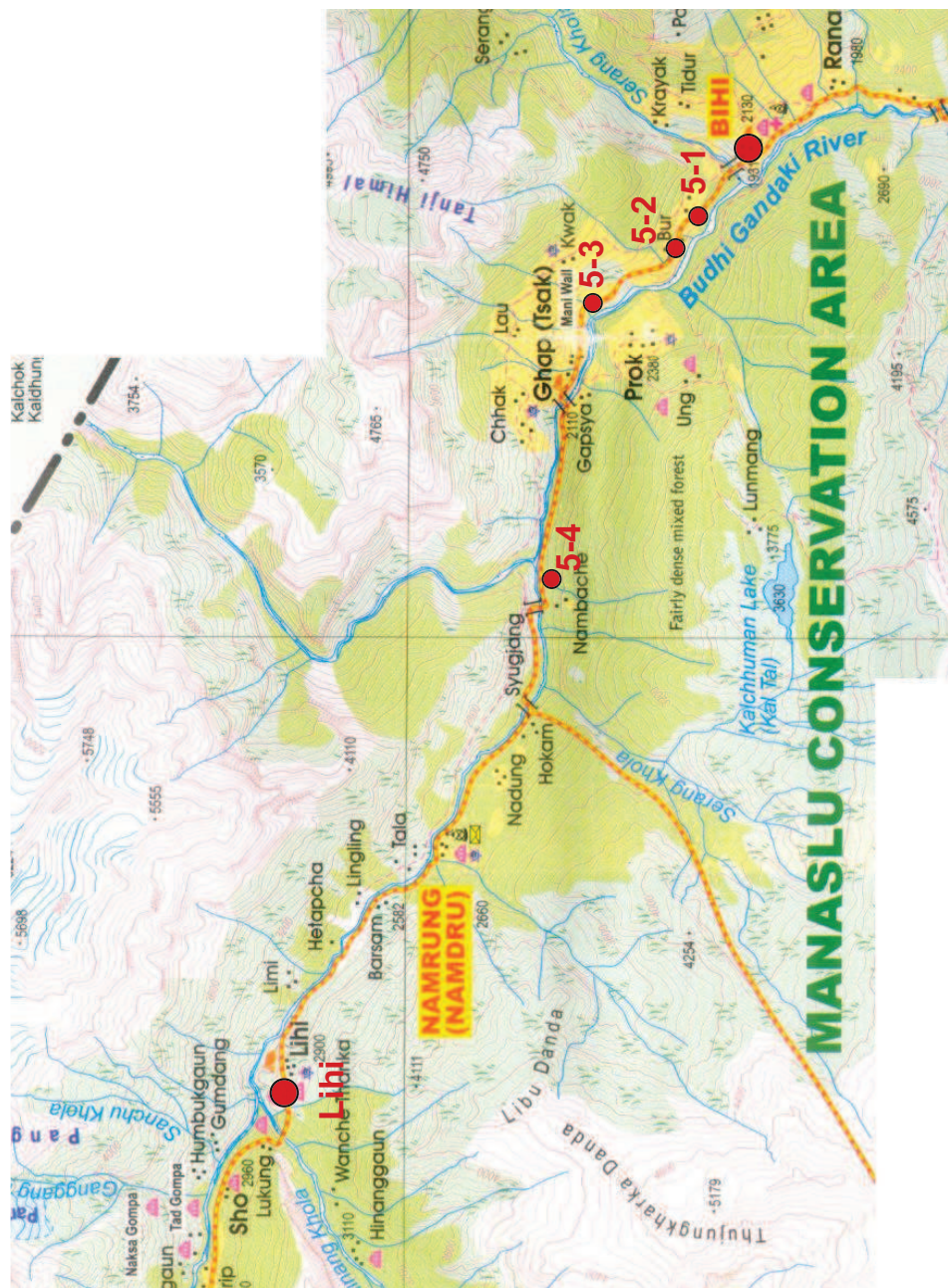


Sommet du Shivling (6543 m), en Himalaya du Garhwal (à l'Ouest du Népal). Une spectaculaire illustration de l'alimentation des granites par la fusion partielle (migmatisation) du Cristallin du Haut Himalaya.

Dans le CHH, les filons sont perpendiculaires à la foliation des migmatites (faute de contraste de couleur, on les distingue mal sur cette photo). Dans la zone de faille Nord himalayenne, ils sont basculés par le cisaillement



L'hypothèse d'un lien direct entre migmatites du CHH et granite du Manaslu s'appuie entre autres sur la concordance entre les données isotopiques du CHH et celles du granite, comme ici les valeurs en Sr initial dans les gneiss du CHH. On retrouve dans le granite les mêmes valeurs très hautes que dans le CHH (<0.75 : protolithe argileux ; >0.75 : protolithe de sédiments quartzo-feldspathiques). Les valeurs les plus hautes (> 0.77) correspondent aux orthogneiss de la Formation III, et ne se retrouvent pas dans le granite du Manaslu (Guillot et Le Fort, 1995)

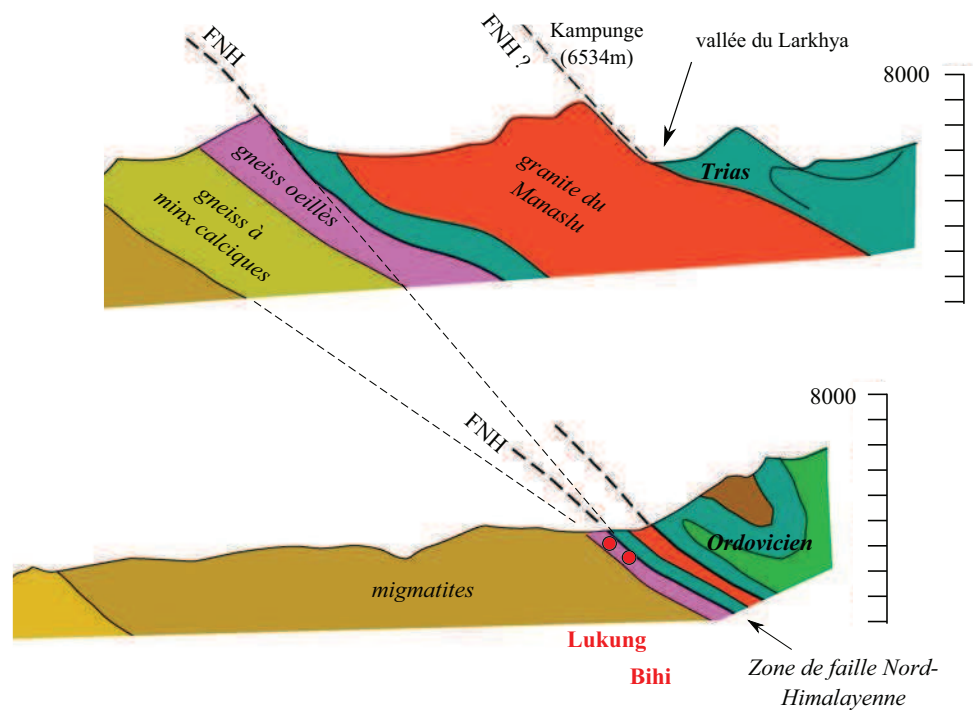


5 km

Bihi → **Liji**
 env 13 km
 2940 m (28°33.69'N / 84°44.31'E)
 1927 m (28°30.17'N / 84°51.90'E)

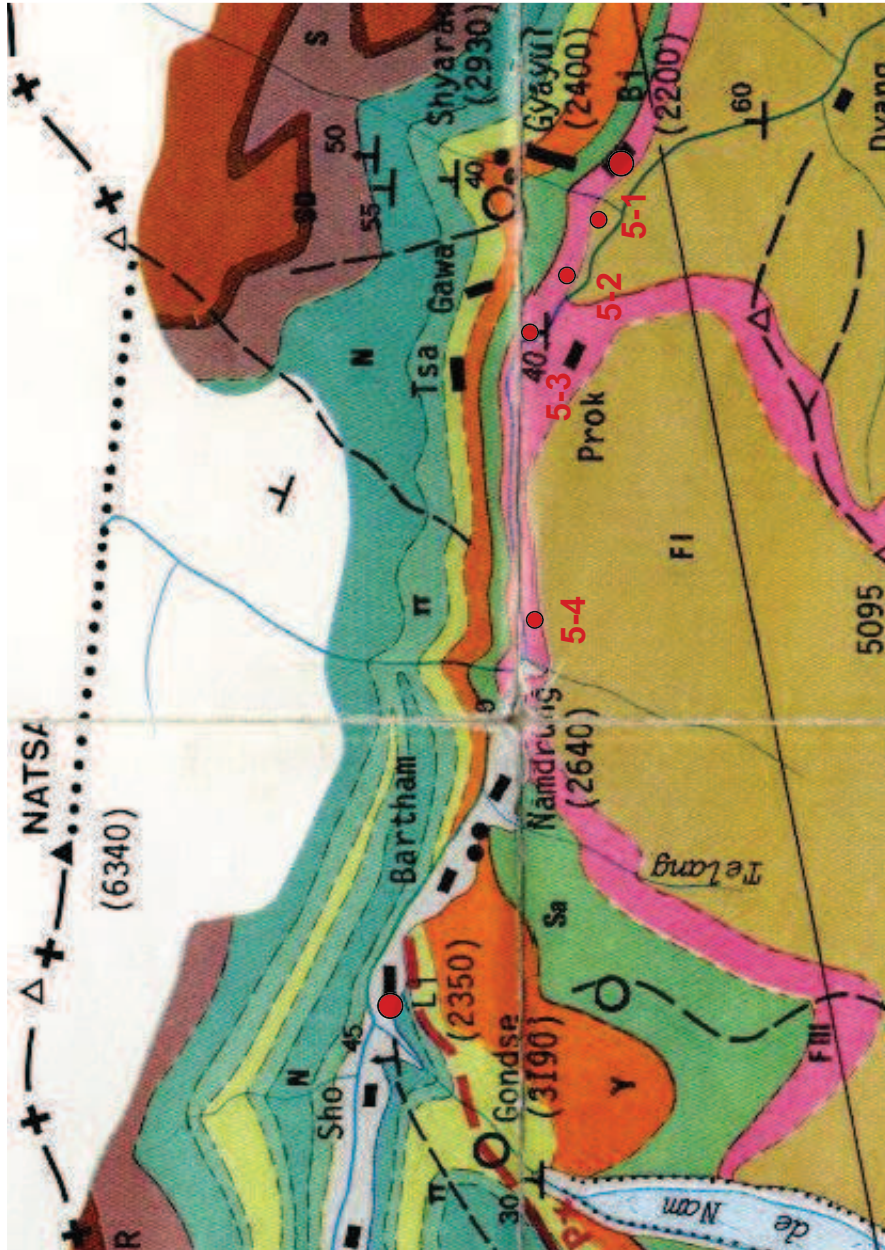
dénivelée montée : 1370 m

Thème : Haut du CHH, Faille Nord Himalayenne, Base des Séries Sédimentaires



De Bihi à Liji puis Samagaon, nous suivons en direction les structures, en nous rapprochant du corps principal du granite du Manaslu. Bihi est construit sur les niveaux les plus hauts du Cristallin du haut Himalaya (les gneiss oeilés de la "Formation III"), déjà affectés par le cisaillement de la zone de Faille Nord Himalayenne. Au-dessus, la base des séries Sédimentaires Tibétaines est métamorphique (présence de pyroxène), et intrudée par une série de grands filons-couches de granite. Il s'agit du "bras de Chhokang", apophyse orientale du granite du Manaslu. Ces filons sont pris dans la zone de FNH et très déformés. Ils se suivent sur près de 50 km vers l'Est, mais leur épaisseur totale n'excède pas 200 m. Par contre, vers l'Ouest (à partir du niveau de Lukung), le granite s'épaissit beaucoup pour former un laccolithe d'environ 7 km de puissance maximum. Son contact sommital monte dans les séries sédimentaires de moins en moins métamorphiques, et atteint le Trias.

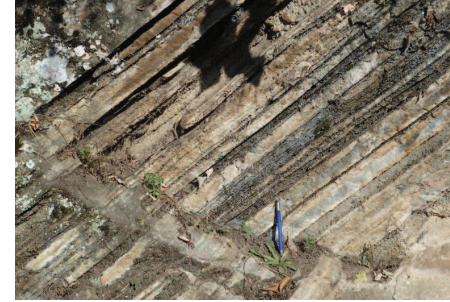
Dans l'Ouest du massif du Manaslu (Himlung Himal), le contact sommital du granite est tectonique, le laccolithe semblant inséré entre deux branches de la FNH. En Burhi Gandaki, la zone de FNH "inférieure" est épaisse et affecte tout le bras de Chhokang. La FNH "supérieure" doit passer plus haut, dans les séries sédimentaires.



Bihi



Lihi



5-1 (28°31.01' / 84°50.99' / 2000 m) Le chemin est passé dans des niveaux un peu plus bas structurellement que ceux de Bihi : on est ici dans les derniers niveaux de la "Formation II" du Cristallin du Haut Himalaya. Il s'agit d'anciens calcaires, marnes, et localement évaporites, transformés par un très fort métamorphisme en gneiss à minéraux calcaïques (avec pyroxène, amphibole, scapolite...)



5-2 (28°31.12' / 84°50.82' / 2000 m))



5-3 (28°31.67' / 84°50.45' / 1820 m)

Bihi est construit sur des gneiss ocellés très spectaculaires : gneiss clairs, à feldspaths potassiques plus ou moins arrondis, pouvant atteindre une dizaine de cm de long. Ces gneiss forment une ou plusieurs lames tout à fait au sommet du Cristallin du haut Himalaya. Leur épaisseur totale peut atteindre 300 m env. Il s'agit d'anciens granites (on parle d'orthogneiss) d'âge Cambro-Ordovicien (480 à 500 Ma), transformés en gneiss par le métamorphisme Himalayen de haute température (gneiss à sillimanite abondante).



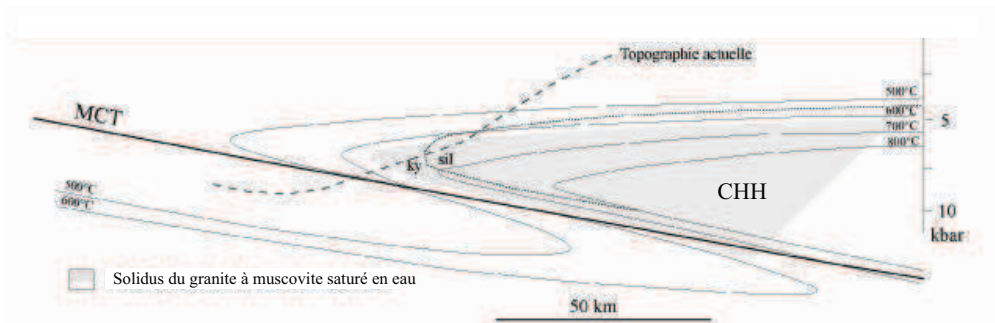
On est dans la zone de Faille Nord Himalayenne, et nous verrons dans ces orthogneiss de nombreux critères de cisaillement ductile.

5-4 (28°32.03' / 84°48.26' / 2150 m) Toujours dans les gneiss ocellés, ici de beaux critères de cisaillement compartiment N vers l'Est : déjà l'expression de l'expulsion du Tibet vers l'Est !

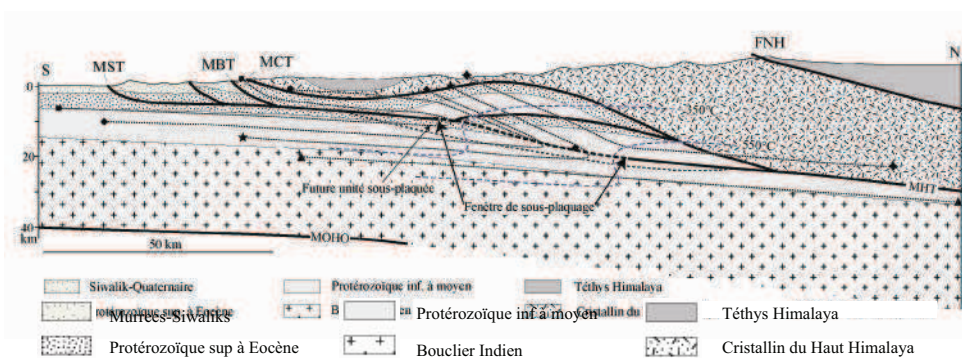
Le métamorphisme inverse en Himalaya

Dans toute la coupe de la Burhi Gandaki, on voit le métamorphisme augmenter du Sud vers le Nord, c'est à dire augmenter du bas vers le haut de la pile métamorphique (puisque les pendages sont vers le Nord). On voit la même chose de l'autre coté du Manaslu, en Marsyandi. Ce dispositif très particulier et paradoxal est connu sous le nom de **métamorphisme inverse** - Plusieurs familles de modèles tentent de l'expliquer, les uns ne mettant en jeu que le fonctionnement de la zone du MCT, les autres associant le métamorphisme inverse à l'**extrusion ductile du Cristallin du Haut Himalaya entre MCT et FNH** :

- le plus ancien (Le Fort, 1975), le modèle du "fer à repasser" (dessin ci-dessous, haut),
- les modèles qui considèrent la zone du MCT comme un empilement d'écaïlles tectoniques. Un modèle qui donne des résultats très conformes à la réalité du terrain : le modèle de sous-placage d'écaïlles (Bollinger et al., 2006, dessin ci-dessous, bas),
- les modèles de "channel flow" (extrusion ductile du CHH, pages suivantes)



Ci-dessous : le modèle du "fer à repasser" (Le Fort, 1975) : le chevauchement des gneiss profonds et chauds du Cristallin du Haut Himalaya (CHH) entraîne le réchauffement par conduction des terrains situés sous le MCT (et donc leur métamorphisme prograde). Au dessus du MCT, la base du CHH est au contraire refroidie (métamorphisme rétrograde).



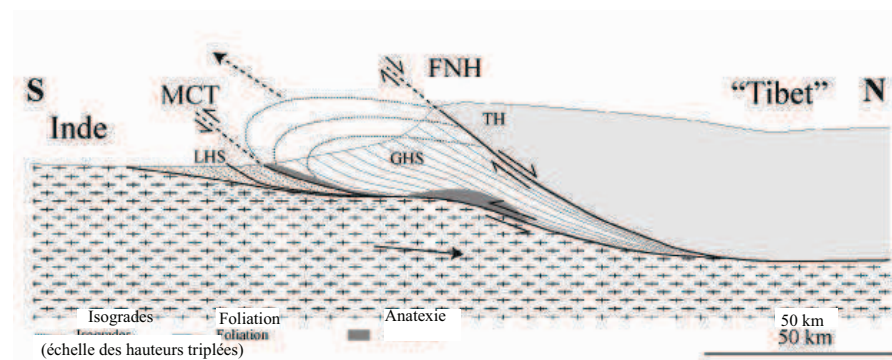
Empilement d'écaïlles tectoniques : le modèle de sous-placage tectonique (Bollinger et al., 2006). "Sous-placage" signifie ici que le raccourcissement est absorbé par déformation essentiellement en dessous du MCT, et non au dessus.

L'extrusion du cristallin du Haut Himalaya

La mise en évidence de la faille Nord Himalayenne (milieu des années 1980), et la constatation que les mouvements sur le MCT et la FNH étaient grosso-modo synchrones, bien que de sens opposés, a profondément modifié l'idée que l'on se faisait des mécanismes de construction du Haut Himalaya : les gneiss semblent en effet extrudés comme une sorte de lame ductile entre un plancher (le MCT) et un plafond (la FNH), deux plans limites qui ont bien sûr des mouvements relatifs opposés. Dans cette vision, la FNH est en partie une "fausse" faille normale.

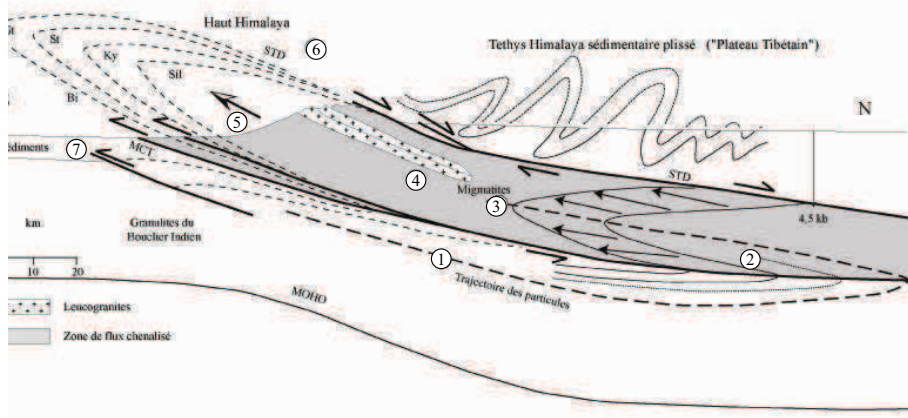
Les possibilités thermomécaniques d'une telle extrusion ont été modélisées et validées numériquement (p. suivante). Le concept a été appliqué (peut être de façon un peu dogmatique !) tout le long l'Himalaya, avec des variantes (extrusion ductile d'un coin, ou extrusion ductile d'une lame). Il permet d'expliquer la plupart des observations de terrain...

Cette démarche est intéressante car elle illustre bien les approches modernes en géologie. Mais ne pas oublier que le modèle n'est vrai que tant qu'il n'est pas faux !

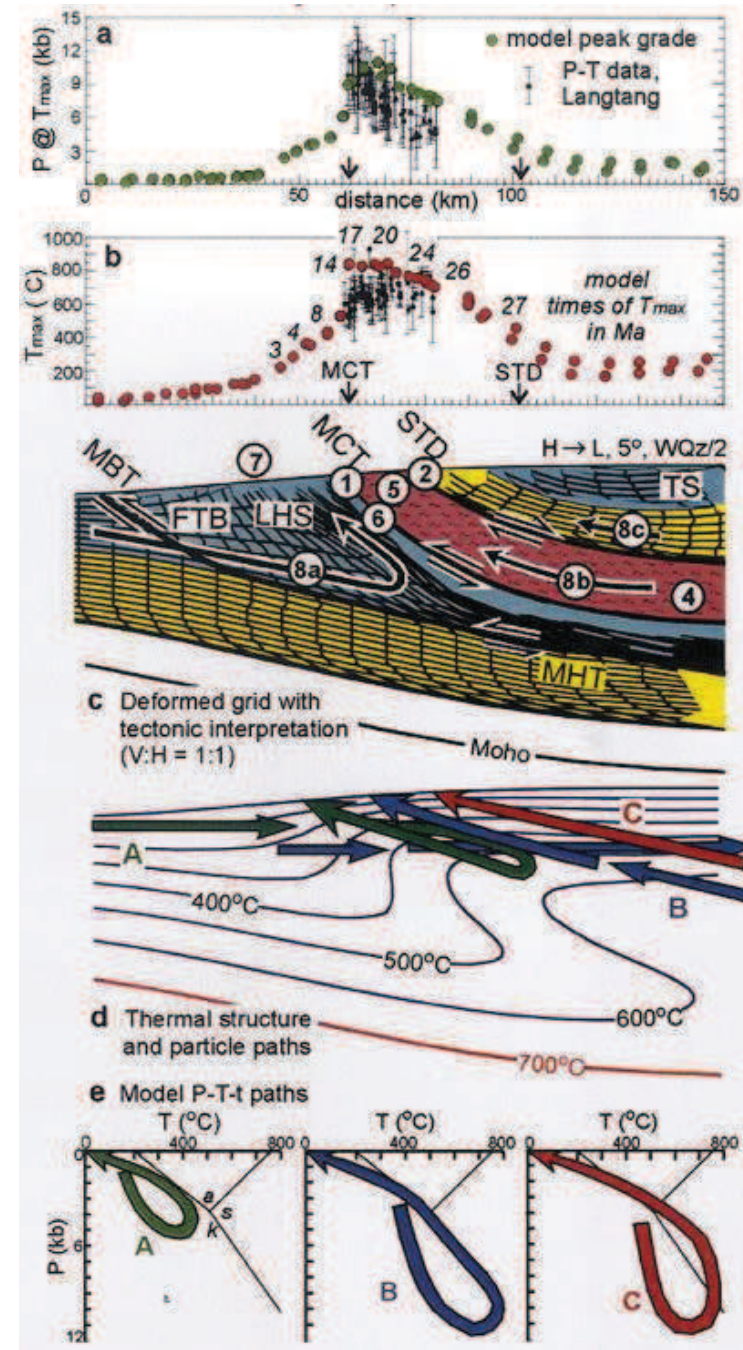


L'extrusion du Cristallin du Haut Himalaya dans un prisme orogénique, entre MCT et FNH.

Ci-contre à droite (p. 49): Résultats d'une modélisation thermo-mécanique de l'extrusion du Haut Himalaya (modèle de "channel-flow") (Beaumont et al., 2001). Dans ce type de modèle, très riche, on peut suivre les trajets P-Tp de différentes particules. Ici trois particules choisies dans le MP sup, dans le CHH et dans la couverture sédimentaire. Les résultats calculés sont cohérents avec les données issues du terrain.



Modèle de fluage appliqué à la région frontière Népal-Sikkim (Searle et Szulc, 2005, in Mascle et al., 2010). 1 : enfouissement, métamorphisme prograde - 2 : conditions P-(T) max, à sillimanite (env. 0.45 GPA et 700°C) - 3 : fusion partielle, migmatitisation, métamorphisme prograde - 4 : injection et cristallisation de leucogranite - 5 : extrusion du Cristallin du Haut Himalaya dans le chenal ductile - 6 : géométrie des isothermes (qui ont une allure "plissée") - 7 : propagation du MCT vers le bas de la pile tectonique.





5 km

Carte schématique de la vallée du Glacier de l'Himal Chuli. Localisations et altitudes en violet rajoutées d'après la carte topographique népalaise au 1:50000e et la carte géologique Colchen et al.1980.

Vallée de Hinan (Himal Chuli)

Lhi

2940 m (28°33.69'N / 84°44.31'E)

Thème : Base des Séries Sédimentaires Tibétaines, gneiss ocellés de la "Formation III"

Carte géologique : voir la carte Lhi - Samagaon, p.52

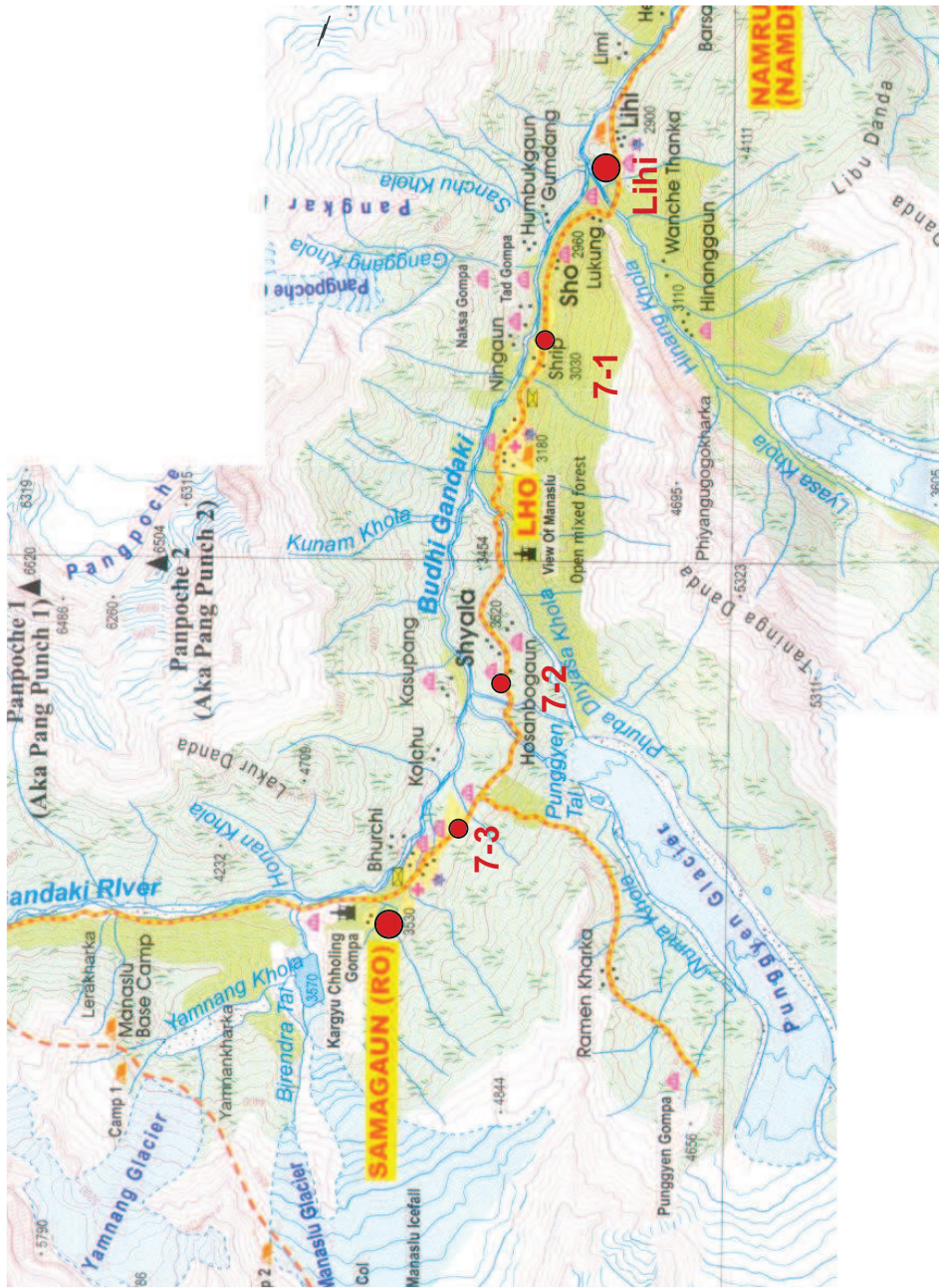
La vieille gompa (monastère) du village de Hinan, 3120 m (28°33.15'N / 84°43.07'E). Derrière le village, les parois RG de la vallée de Hinan sont fait de la base déjà très métamorphique des séries de la couverture sédimentaire du Haut Himalaya. Au fond, de l'autre coté de la vallée de la Burhi, formant le versant du Kuthan Himal (6264 m), des formations calcaires du Cambro-Ordovicien.



6-1 (28°32.14'N / 84°41.79'E / 3464 m) - La vallée du glacier de Hunan offre de très belles vues sur le versant N de l'Himalchuli (7893 m), entièrement formé de gneiss du Cristallin du Haut Himalaya. En remontant la rive gauche de la vallée, on est dans des moraines anciennes, il y a peu d'affleurements. A la base d'un éperon RG du vallon suivi par le chemin, affleurement de gneiss ocellés recoupés par des masses irrégulières de granite du Manaslu (le contact principal du granite est nettement plus haut dans le versant, mais des coulées récentes permettent d'en voir de très beaux blocs)



6-2 (28°31.92'N / 84°41.65'E / 3562 m) - De la crête morainique au dessus d'un groupe de karkhas (chalets d'alpages), belle vue sur le glacier de Hinan, dont la base est entièrement recouverte de débris et végétalisée



5 km

Samagaon j7 (1)

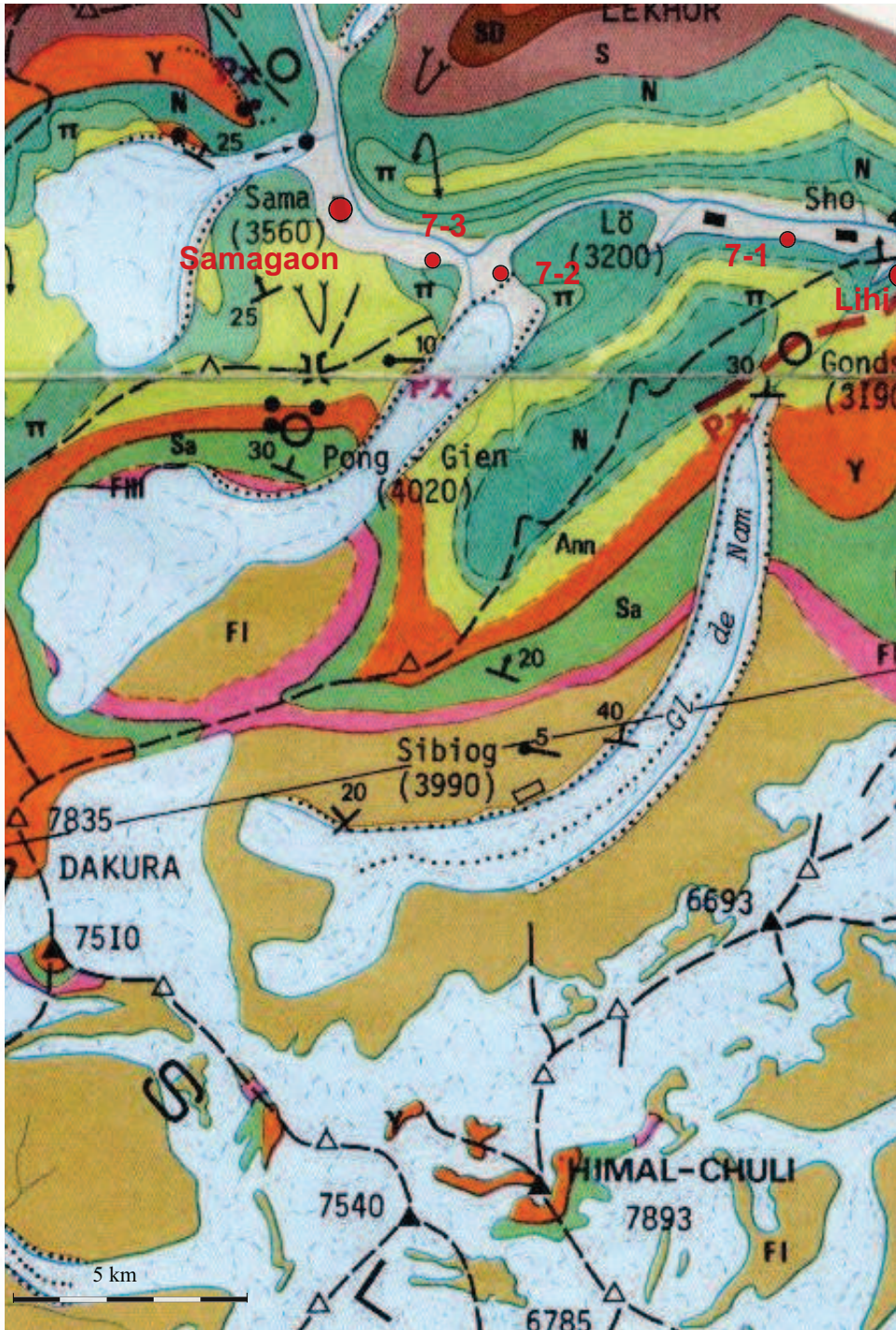
env 11 km ↗

Lihi 2940 m (28°33.69'N / 84°44.31'E) 3530 m (28°335.21'N / 84°38.46'E)

dénivelée montée : 975 m

Thème : Base des Séries Sédimentaires Tibétaines, "pli des Annapurnas" à regard Nord, Quaternaire du bassin de Samagaon.

De Lihi à Samagaon, nous sommes toujours dans le tronçon de la Burhi où son cours est parallèle aux structures. La géologie change donc peu par rapport à ce qui a été vu les deux jours précédents. Par contre, dans toute cette partie, la morphologie des terrasses fluviales quaternaires est très spectaculaire.



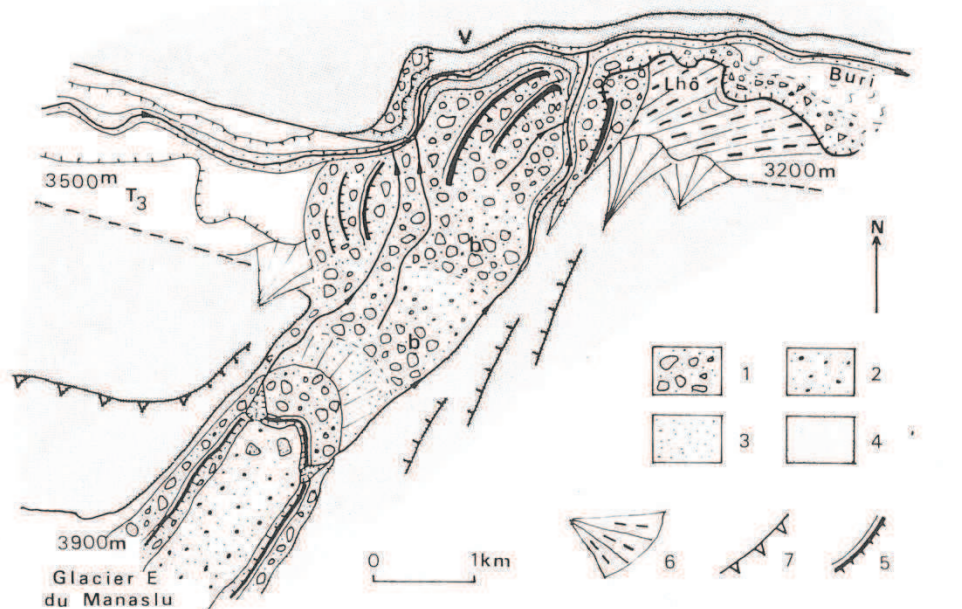
7-1 (28°34.19' / 84°42.79' / 3040 m)
Toujours dans les calcaires de la base de la série paléozoïque, assez fortement métamorphisés (pyroxène). Affleurement intéressant pour les structures : on voit ici des plis qui indiquent un mouvement de cisaillement vers le Nord. Donc mouvement de type FNH, et réplique à échelle métrique du "pli des Annapurnas", de taille kilométrique.

7-2 (28°34.39' / 84°40.29' / 3510 m) Du sommet de Shyala, vue sur le Naïke (6211 m), satellite NE du Manaslu. Dans son versant Sud (ph. ci-dessous), on reconnaît un énorme pli dessiné par les calcaires du Paléozoïque : c'est le "pli des Annapurnas" (cf p. 62 et 63) Sa charnière regarde vers le Nord, et indique un glissement de toute la couverture sédimentaire vers le Nord.



7-3 (28°34.54' / 84°39.44' / 3520 m) Au début de la grande terrasse Quaternaire de Samagaon (cf. carte schématique p. 57)

Le Quaternaire du bassin de Samagaon



: LE COMPLEXE MORAINIQUE AVAL DU BASSIN DE SAMA

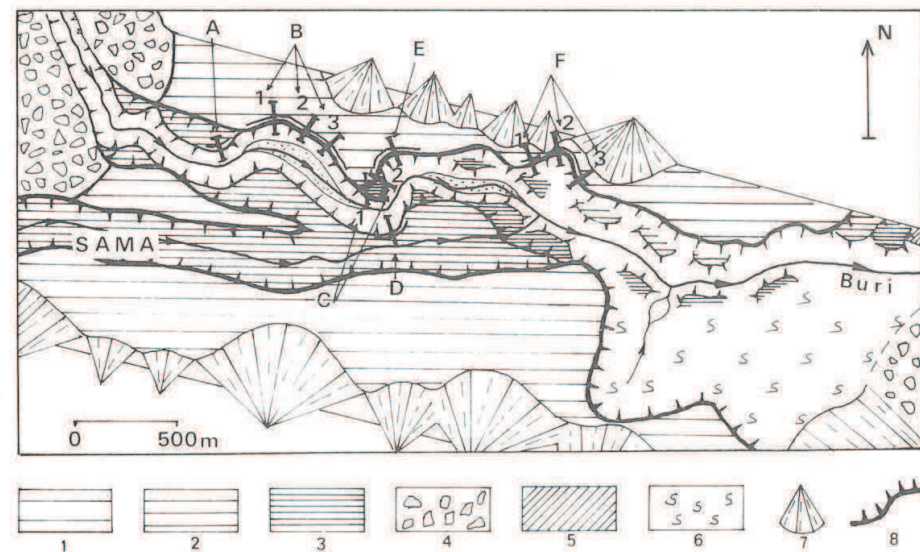
1 : moraines frontales et latérales - 2 : moraine superficielle d'ablation - 3 : lit de la Buri Gandaki, épandages supra-glaciaires - 4 : substrat - 5 : vallum - 6 : cône proglaciaire de Lhō - 7 : crêt monoclinial (flanc inverse du pli du Manaslu) - V : verrou - b : ressaut à gros blocs - T3 : terrasse supérieure de Samagaon

Ci-dessus : le complexe morainique aval de Sama. Ce complexe est issu d'une ancienne avancée du glacier Est du Manaslu (glacier de Punggen). Morphologiquement, ce complexe s'élève d'environ 300 m au dessus du lit de la Burhi gandaki. Il est formé de la juxtaposition de plusieurs cordons morainiques séparés par des sillons, arqués vers l'aval. L'ensemble se prolonge tout en aval et en rive droite par un vaste cône, qui se raccorde à la terrasse sur laquelle le village de Lho est installé.

Les eaux de fonte du glacier de Punggen ont entaillé ce complexe, offrant des coupes permettant d'observer la variété des faciès sédimentaires constituant cet ensemble morainique : des niveaux de "till" (matériau très hétérogène où de gros blocs sont emballés dans une matrice fine) alternent avec des niveaux mieux triés et lités, aux blocs déjà largement émoussés, voire roulés, qui traduisent le rôle des eaux de fonte dans tout ce système glaciaire terminal. La présence de cette épaisse masse morainique est à l'origine du blocage de la vallée en amont, et des puissantes accumulations détritiques qui sous-tendent la terrasse de Samagaon.

Ci-contre : les terrasses du bassin de Samagaon - Le bassin de Sama se développe entre le complexe morainique de Punggen (en amont de Lho) et celui de la moraine du glacier NE du Manaslu. Vaste étendue plane, ce bassin résulte du colmatage du fond de la vallée par des épandages fluvio-glaciaires puissants (sédiments roulés par les eaux de fonte glaciaires) issus du glacier du Manaslu. A mi-hauteur, on peut localement observer des niveaux lacustres, traduisant un blocage temporaire de la vallée de la Burhi par le glacier de Punggen. Depuis la rivière a entaillé ces dépôts en plusieurs étapes, responsables des niveaux de terrasses observés.

Le Quaternaire du bassin de Samagaon



1 : terrasse supérieure ou principale - 2 : terrasse intermédiaire - 3 : terrasse inférieure - 4 : moraines amont et aval - 5 : bed-rock - 6 : mouvements de terrain et solifluction - 7 : cônes d'avalanche ou torrentiels - 8 : rebord de terrasse



Les terrasses emboîtées de Samagaon (image Google Earth)



5 km

env 8 km

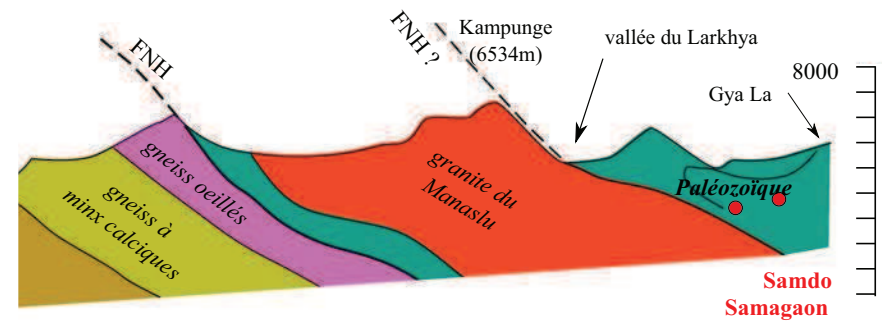
3850 m (28°38.96'N / 84°38.01'E)

3530 m (28°335.21'N / 84°38.46'E)

dénivelée montée : 430 à 1400 m

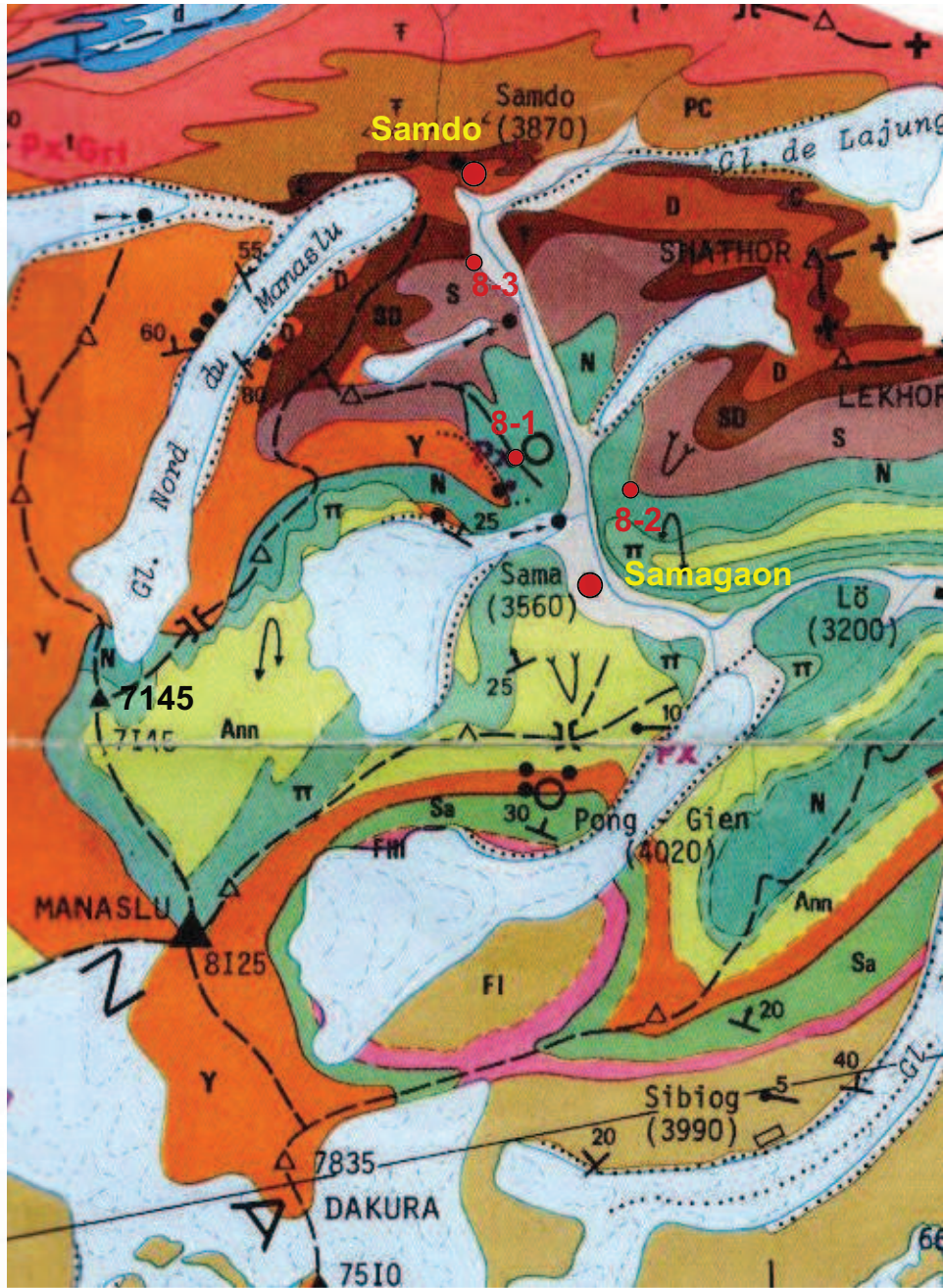
Thème : Lacs glaciaires, base des Séries Sédimentaires, pli des Annapurnas, géologie de paysage sur le granite

Plusieurs montées facultatives depuis le chemin principal : sur la moraine dominant le lac de Birendra (400 m de dénivelée, arrêt 8-1); dans le vallon de la Honan khola, en RG de la Burhi, vis à vis du glacier du Manaslu (200 à 600 m de dénivelée, arrêt 8-2); en RD de la Burhi peu avant le pont de Samdo (env. 100 m, arrêt 8-3).



Les lacs de retrait glaciaire

Dans les hautes vallées, le recul marqué de la plupart des glaciers actuels se traduit par le développement, de plus en plus rapide, de lacs pro-glaciaires en arrière des moraines frontales. Le phénomène est particulièrement spectaculaire dans ces vallées intérieures, situées à env. 4000 m d'altitude, occupées par des langues glaciaires à faible pente longitudinale. Plusieurs milliers de ces lacs ont ainsi été répertoriés en Himalaya. Certains sont drainés naturellement. D'autres sont fermés et ils inspirent de fortes inquiétudes du fait de la fragilité apparente de leur barrage morainique, qui peut céder suite à la montée des eaux engendrée soit par la fusion accélérée du glacier soit par la formation d'une vague provoquée par une chute de séracs ou par des mouvements de terrain. Dans un passé récent, plusieurs crues catastrophiques se sont produites (zones de l'Everest, du Bhoutan et du Mustang), causant de très graves dégâts sur des dizaines de kilomètres en aval, dans les zones habitées. La surveillance de certains de ces lacs à l'aide d'images satellitaires permet de suivre chaque année l'augmentation de leur surface et, le cas échéant, de mettre en oeuvre des mesures de drainage d'urgence pour protéger les populations.

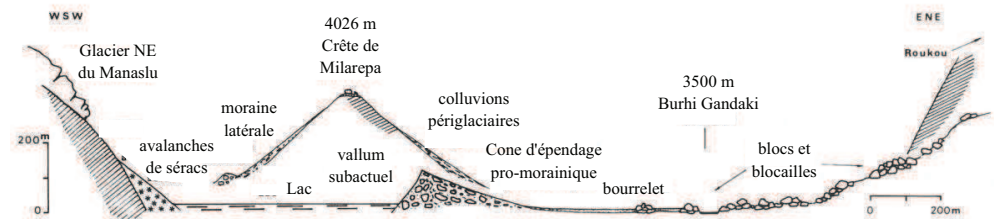


De Samagaon, on suit la RD de la Burhi, d'abord jusqu'au torrent issu du Glacier du Manaslu. Il vient d'une entaille dans l'imposant système de moraines frontales de ce glacier. En arrière de cette moraine, le retrait du glacier a laissé place à un lac (Birendra Tal). Pour voir mieux ce système glaciaire, et pour voir les relations entre granite du Manaslu et pli du Naike (pli des Annapurnas), on peut remonter plus ou moins haut soit la grande moraine au Nord du lac (8-1), soit dans le petit vallon de la Honan khola, en RG de la Burhi (8-2, p.62)

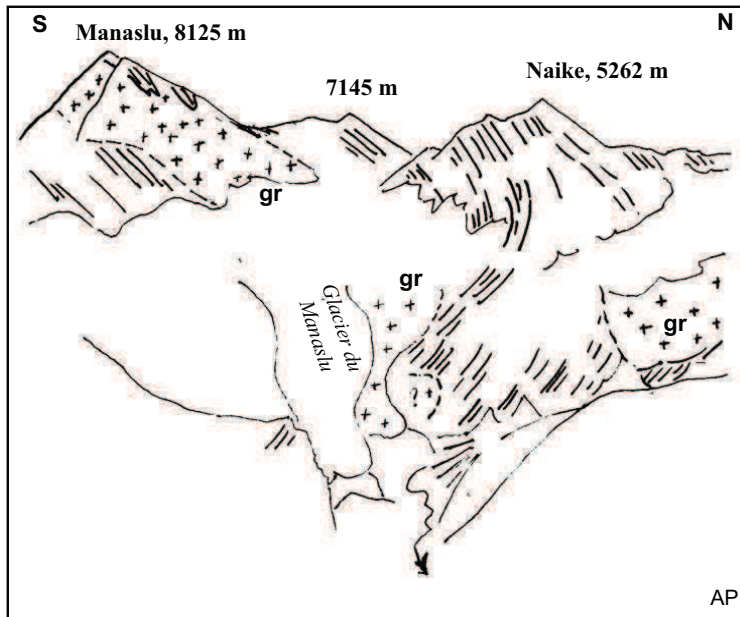


Le lac morainique du glacier du Manaslu (lac Birendra): la marge glaciaire du glacier évolue constamment. Le glacier recule, et le lac en contrebas pourrait être impacté par des chutes de séracs. De brusque vidanges de ce lac se sont déjà produites, comme le montrent les vastes épandages de débris ou les bourrelets de blocailles accumulés en avant de la moraine frontale du glacier. Cette moraine date vraisemblablement du Petit Age de Glace (17^{ème} - 19^{ème} siècles).

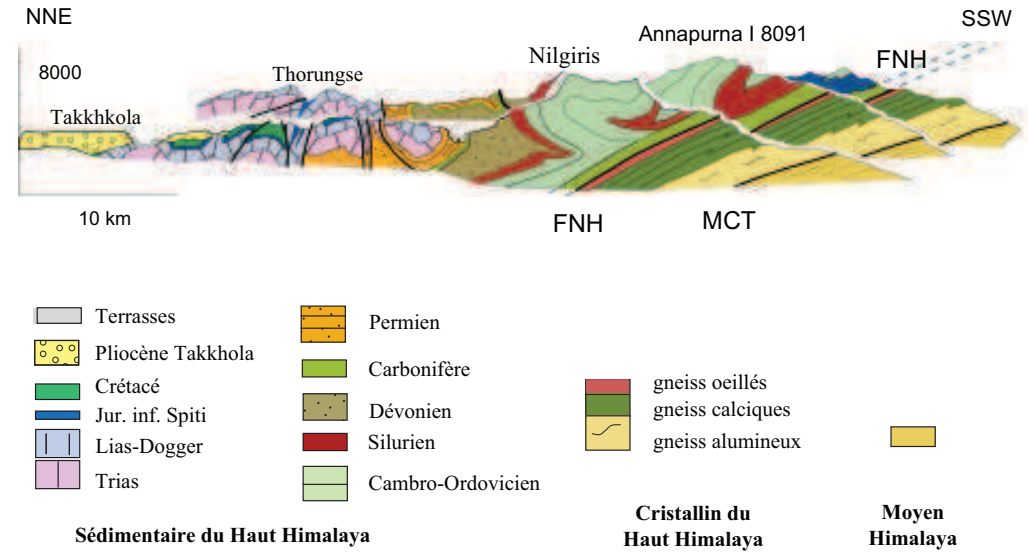
8-1 Au sommet de la moraine au N du lac (4020 m / 28°36.43'N / 84° 37.89'E, crête de Milarepa, schéma ci-dessous) D'ici (photos ci-dessus), on voit bien les terrasses de Samagaun au fond, et les anciennes moraines frontales du glacier du Manaslu, recolonisées par la végétation, mais percées en plusieurs endroits lors de brutales vidanges. Photo ci contre, prise en 2012 : le Manaslu et songlacier NE, qui vient vèler dans le lac Birendra.



Profil transversal de la marge frontale du glacier du Manaslu (M. Fort, 1979)
(hachuré : substrat rocheux, formations sédimentaires métamorphisées)



8-2 Du vallon de la Honan Khola, vue sur le versant NE du Manaslu. Noter le grand pli à vergence Nord, prolongation vers l'Est du pli des Annapurnas (voir ci-contre p.63, mais attention, la coupe est orientée en sens opposé). Ce pli semble recoupé par le granite du Manaslu. Au front du glacier, le lac de retrait glaciaire de Birendra. Noter la diminution de la longueur de la langue terminale du glacier, entre 1979 (cette photo) et 2012 (photo 8-1, p 61).



Coupe de la RG de la Kali Gandaki (extrémité Ouest du massif des Annapurnas) (d'après Colchen et al, 1978, in Mascle et al., 2010). Noter le pli pluri-kilométrique à vergence N formant le sommet des Nilgiris. Ce pli a été reconnu en direction sur au moins 150 km de long, jusqu'à l'Est de la Burhi, où nous le verrons dans le paysage (ci-contre). C'est un pli complexe, qui reprend d'anciennes structures, et se développe dans des formations assez mal calées chronologiquement car de lithologies très voisines (Paléozoïque inférieur métamorphique). Son interprétation varie :

- structure gravitaire collapse (c'est à dire d'effondrement gravitaire) au dos de la FNH,
- structure appartenant à une nappe ante-FNH à vergence Nord, rappelant alors la nappe eo-himalayenne de Shikar Beh au Ladakh (synclinal déversé Nord de Tandi).

8-3 (env. 28°38.40' / 84°37.90' / 3930 m) En remontant le cône de déjection RD Burhi, peu en aval de Samdo, affleurement de "calcaires des Nilgiris" (Ordovicien)





photo M. Fort

Vallon glaciaire au nord du vallon du Larkya (le vallon du Gya La part sur la droite)

Le Glacier Blanc, vu de la montée au col du Lajin (4998 m). Les glaciers sont des systèmes ouverts, alimentés en amont par les chutes de neige, les avalanches et les apports détritiques, et soumis à des pertes (ou ablation) en aval par fusion ou sublimation. Le glacier Blanc naît d'un bassin d'alimentation qui culmine à près de 7000 m.

Ce glacier est un glacier "froid" (la température de la glace est $<0^{\circ}\text{C}$, en dessous du point de fusion), qui ne glisse pas sur son lit mais se meut par fluage de la glace (déformation plastique et recristallisation dynamique des cristaux sous l'influence du poids de la glace et de la pente). Ceci explique en particulier le fait que la langue est "décollée" des versants.

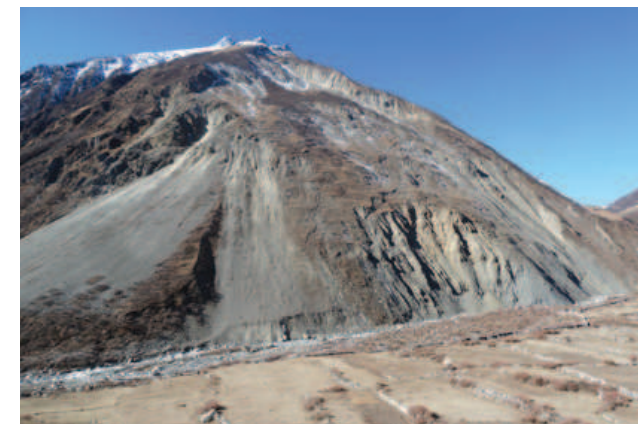
Le village de Samdo ($28^{\circ}38.96' / 84^{\circ}38.01' / 3850 \text{ m}$) est le dernier village permanent de la haute Burhi Gandaki. Les trekkers s'y arrêtent souvent pour une journée d'acclimatation avant le passage du Col du Larkya. De Samdo même, on remarquera surtout vers l'Est les imposantes moraines du glacier Sonam, descendu des pentes du Samdo Himal (6335 m). Très spectaculaires aussi, vers l'Ouest, les glissements de terrain en RD de la Burhi. Les vallons du Lajin La et du Gya La, au Nord de Samdo, permettent de voir eux aussi de très belles morphologies glaciaires (photo ci-contre), de nombreux et vastes glissements de terrain, et d'avoir un aperçu sur les Séries Sédimentaires non métamorphiques du Haut Himalaya (carte géologique p. 76)

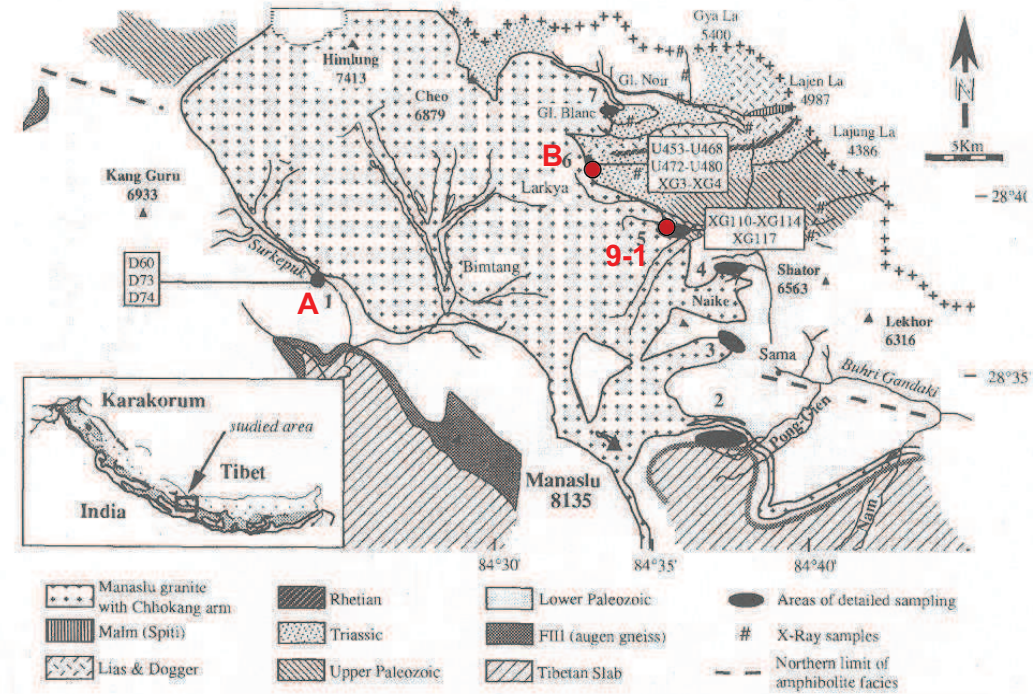
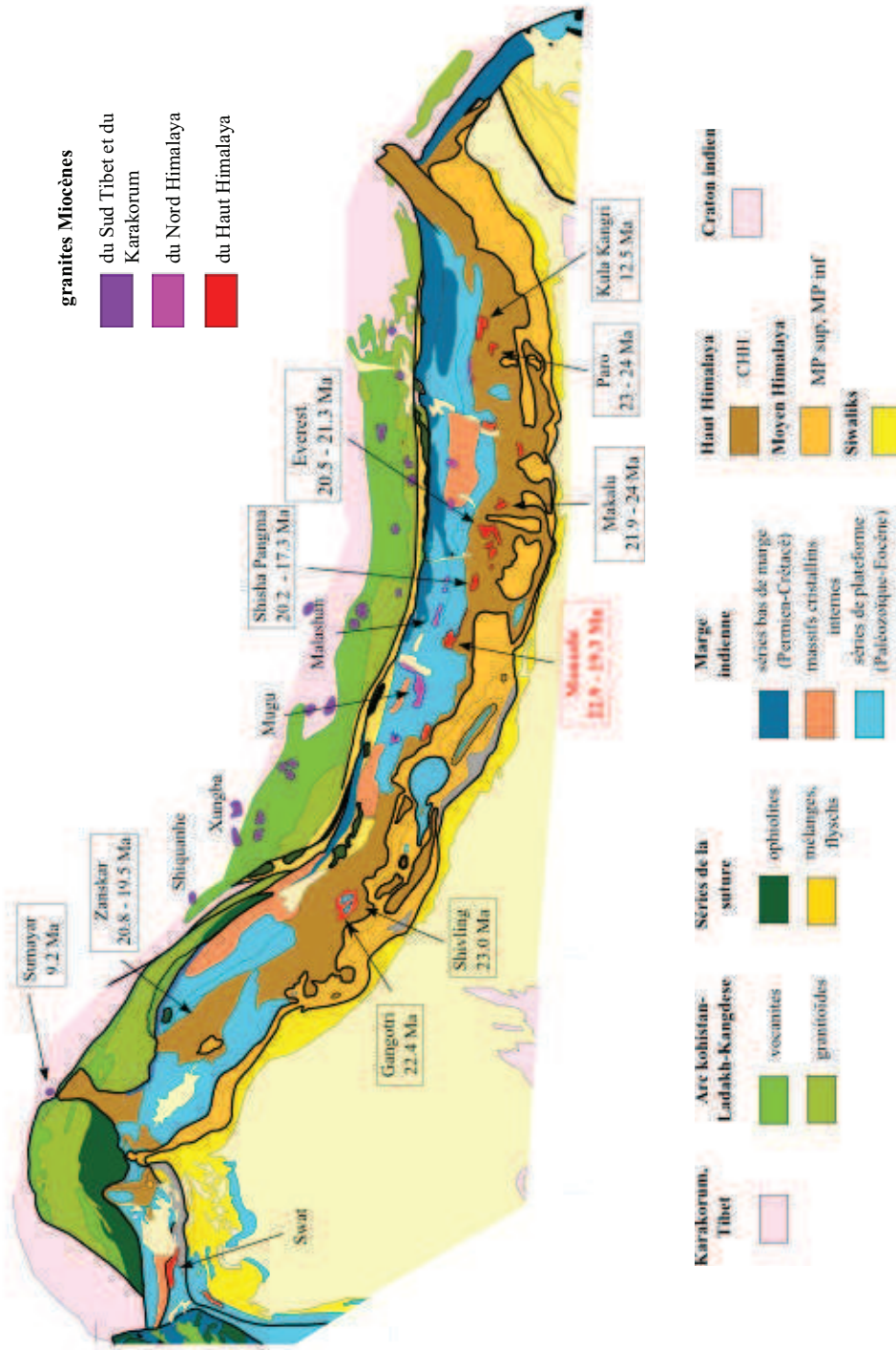


Le village et le glacier de Samdo
(photo M. Fort, 1975)

Le glacier actuel de Samdo (ou de Sonam) descend du Samdo (ou Ruku) Himal, à 6335 m. De belles moraines latérales, datant du Petit Age de Glace, enserrment le glacier presque enterré sous sa couverture de débris. Le village de Samdo (3850 m) est lui même installé sur une moraine frontale datant de moins de 10 000 ans.

En face de Samdo, glissements de terrains emboîtés les uns dans les autres (photo prise en 2012). On voit bien dans le haut de la pente la niche d'arrachement du glissement principal, repris dans sa partie basse par un glissement plus jeune.



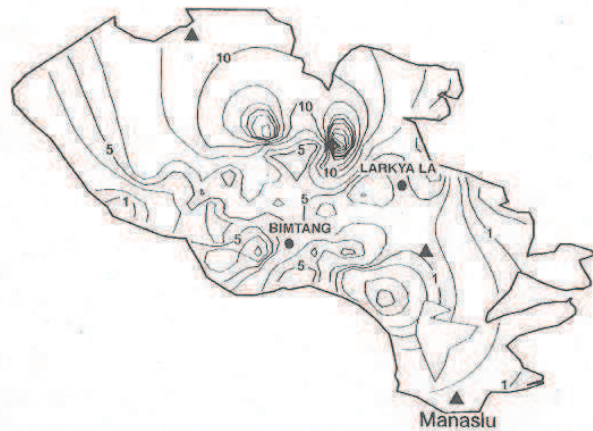


Carte du granite du Manaslu. Ce granite est le granite himalayen qui a été le premier étudié en détail (travaux de P. Le Fort et S. Guillot), et il reste une référence fondamentale. Très hétérogène isotopiquement (ce qui interdit les datations "classiques" par isochrone) et très jeune (ce qui veut dire très peu d'éléments fils pour les datations isotopiques), il est difficile à dater. Seul un échantillonnage très serré sur quelques coupes (figure ci-dessus) et des méthodes innovantes (par exemple la datation grain par grain sur des cristaux de monazite) ont permis de lui attribuer un âge, ou plutôt des âges. On a ainsi pu mettre ainsi en évidence un processus d'alimentation et de croissance du granite par "batches" successifs de magma, issus de gneiss plus ou moins alumineux du Cristallin du Haut Himalaya.

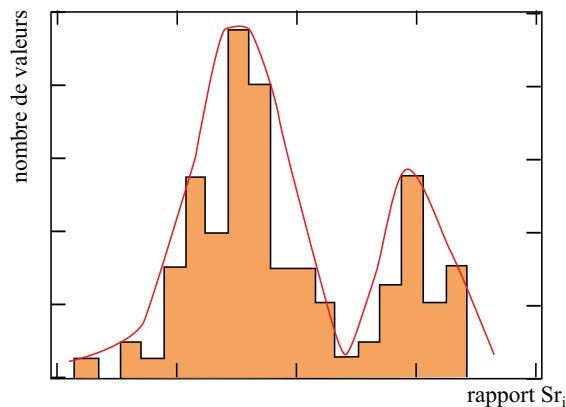


Ci-contre, les sommets du Baghirati (6856 m) en Himalaya du Garhwal. Un gisement typique des granites himalayens, en énorme lentille infiltrée à la base des Séries Sédimentaires Tibétaines. En sombre, les calcschistes du Paléozoïque. En clair, une lentille (épaisseur : env. 1000 m) de granite de Gangotri, daté à 22.4 Ma (cf carte ci-contre)

Le granite du Manaslu est typiquement un leuco-granite (granite pauvre en minéraux ferromagnésiens, biotite en particulier), produit par fusion crustale. Il est pétrographiquement hétérogène, et comporte deux pôles principaux, un granite à deux micas, riche en muscovite, et un granite à tourmaline, moins abondant. Cette hétérogénéité traduit la variabilité pétrographique et chimique des roches source (le CHH, cf p. 41), dont il est issu par fusion partielle. Elle donne une hétérogénéité chimique, surtout mise en évidence au niveau des compositions isotopiques. En se basant sur les compositions Rb/Sr et $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, on peut penser que le granite à tourmaline provient de la fusion anhydre des métapélites du CHH à HT (vers 800°C), tandis que le granite à deux micas provient de la fusion hydratée des meta-greywackes du CHH, à un peu plus basse température.



Ci-contre, carte des variations du rapport Rb/Sr dans le granite (d'après Harrison et al., 1999). Les zones à Rb/Sr faible (qui ont aussi un rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ initial moins élevé) correspondent aux zones où le granite à 2 micas est prépondérant (Sud du massif).



Histogramme des rapports Sr_i dans le granite du Manaslu (Guillot et Le Fort, 1995). Les zones à Sr_i faible correspondent aux zones où le granite à 2 micas est prépondérant.

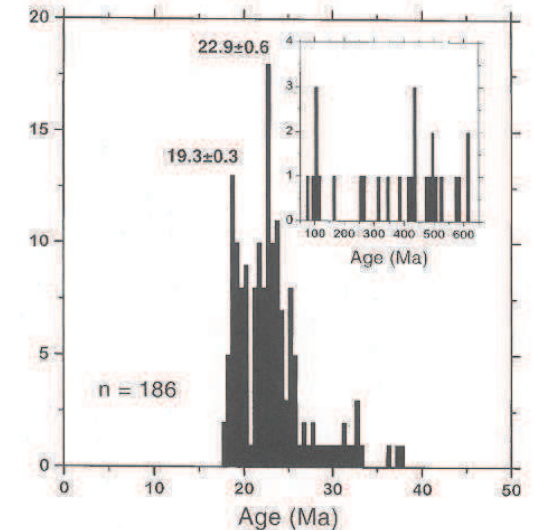
Un bloc de la moraine du glacier du Larkhya, montrant plusieurs faciès du granite du Manaslu. Même si l'on voit ici un granite gris recoupant un granite plus blanc (le granite clair serait donc plus ancien que le granite gris), il n'y a pas de relation d'âge relatif systématique entre les différents faciès du granite.

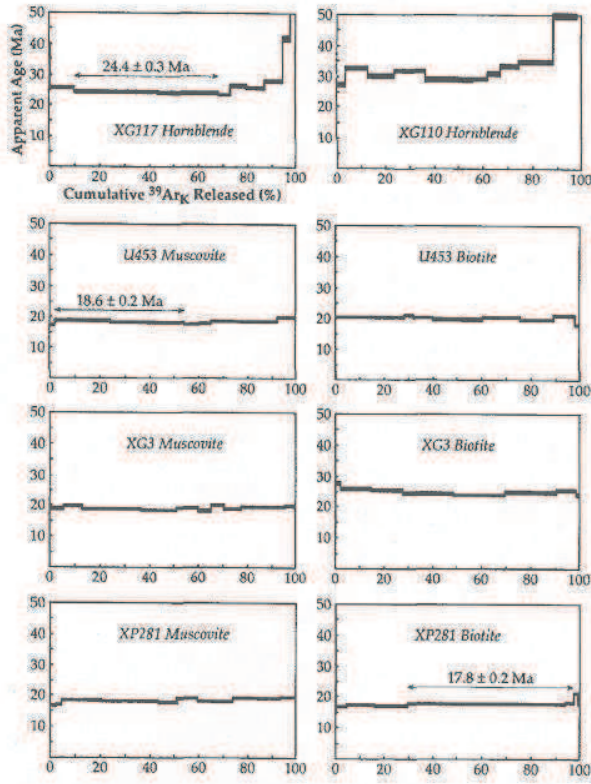


Le granite, très hétérogène isotopiquement, ne peut être daté que ponctuellement (échantillon par échantillon, ou comme ici grain par grain). L'histogramme ci-contre (Harrison et al., 1999) montre la répartition statistique des âges Th-Pb sur 158 monazites post-50 Ma réparties dans 11 échantillons.

Il ressort une mise en place en deux temps du granite : autour de 23 Ma (phase "Larkhya"), et autour de 19 Ma ("phase Bimtang"). La phase Larkhya résulterait de la déshydratation anhydre de la muscovite dans le CHH, tandis que la phase Bimtang serait produite par fusion à température plus élevée.

Ces âges sont aussi utilisés pour caler le fonctionnement de la FNH, synchrone semble-t-il de la mise en place du granite.



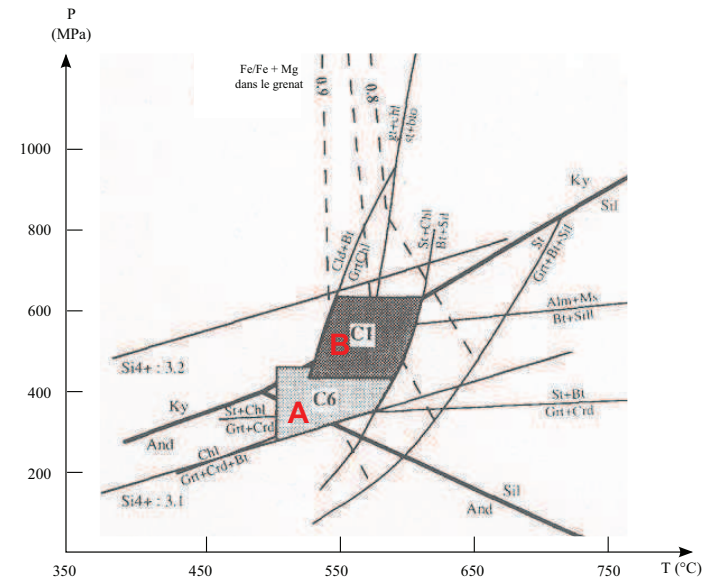


L'âge de cristallisation du granite, très hétérogène isotopiquement, est difficile à établir. Une indication sur son âge de mise en place peut-être donnée par la datation du métamorphisme de contact qui lui est associé (ci-contre, données de Guillot et al., 1994).

Les "âges plateaux" $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ sont assez bien définis. Pour les hornblendes (amphiboles), on obtient des âges vers 22-24 Ma, montrant qu'une partie de l'intrusion est antérieure à cet âge. Pour les micas, les âges vont de 16 à 19 Ma, indiquant un épisode de refroidissement à cette époque (effet possible de la dénudation tectonique liée au jeu de la FNH).

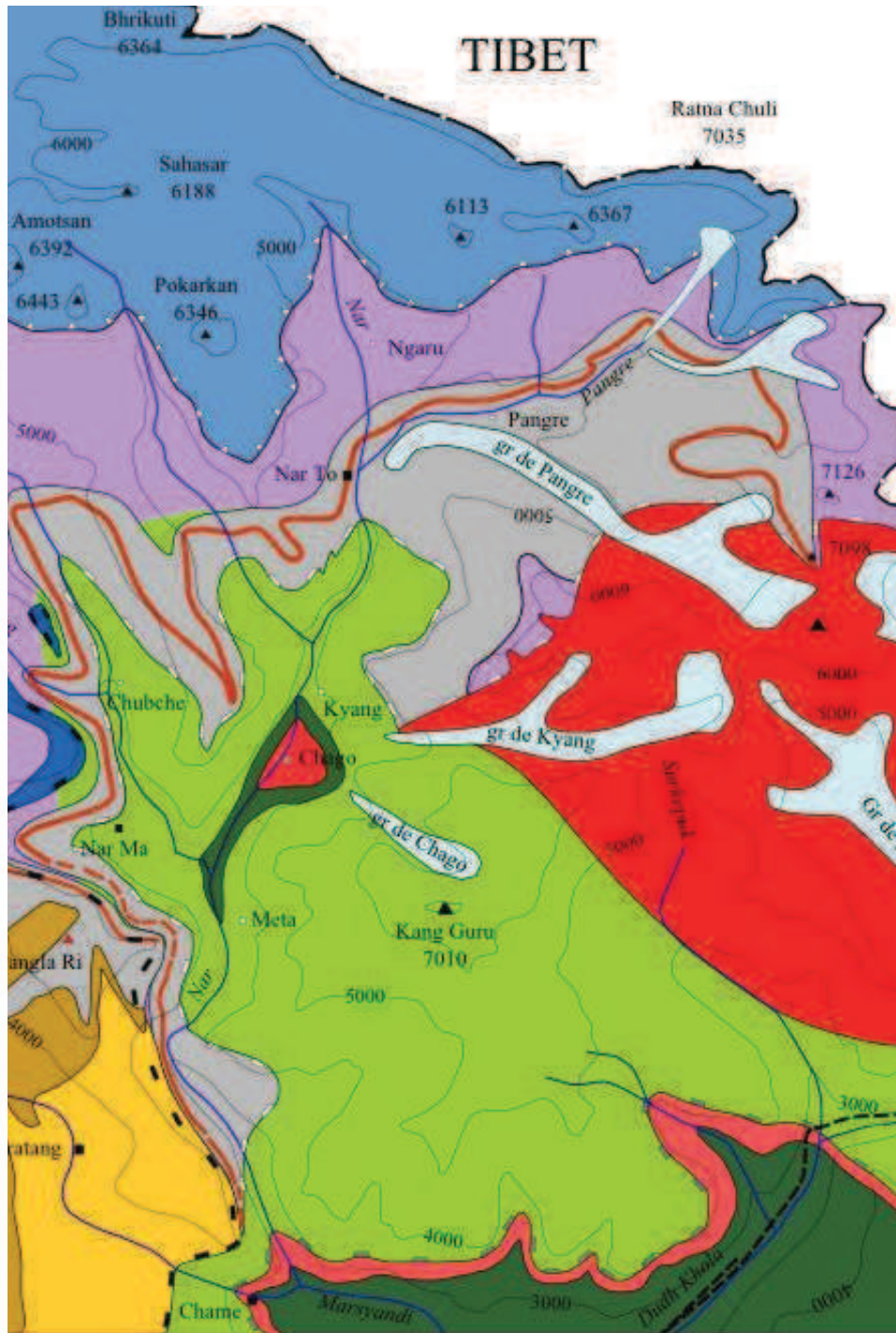


Du Larkhya, en RG du glacier du Cheo, le contact intrusif du granite (clair, en bas) dans le Trias (sombre, formant la crête). Position : point B de la carte p.67

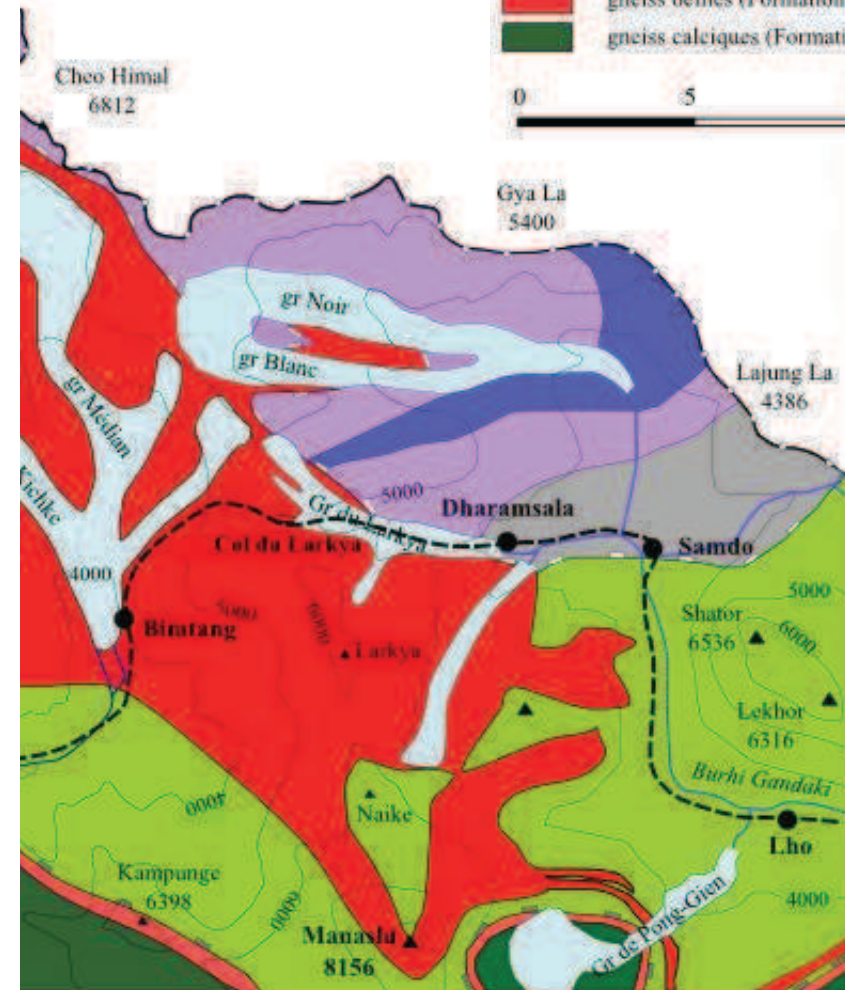


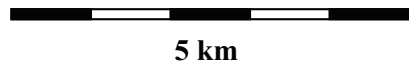
L'étude du métamorphisme de contact permet aussi de déterminer les conditions P-Tp atteintes à proximité immédiate du granite dans les roches sédimentaires de l'encaissant. De la pression, on peut tirer une estimation de la profondeur de mise en place du granite. La température est plus délicate à interpréter. Ici, conditions atteintes dans les sites C1 (contact à la base du granite, point A carte p.67) et C6 (contact au toit du granite, point B carte p.67) (Guillot et al., 1995). Pression en A : environ 350 MPa; en B : environ 500 Ma. On peut en déduire la mise en place vers 10 km de profondeur d'une lentille de granite d'environ 5 km d'épaisseur.

Granites du Haut Himalaya (4)



Sur cette carte (Le Fort et Guillot, 1999) établie à la suite d'une expédition au Himlung Himal (7126m) en 1997, noter 2 grandes zones de FN non cartographiées sur la carte de 1980 : la FNH, qui suit le haut de la F3 du CHH ; et une autre faille normale, qui formerait tout le contact N du granite. Reconnue dans la région de Pangre, à l'Ouest du granite, elle devrait passer près de Samdo. Qu'en est-il au dessus de Dharamsala ?



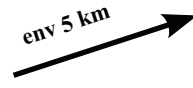


Tiré épais rouge : limite orientale du granite du Manaslu

Dharamsala

j9 (1)

Samdo



4470 m (28°39.55'N / 84°35.05'E)

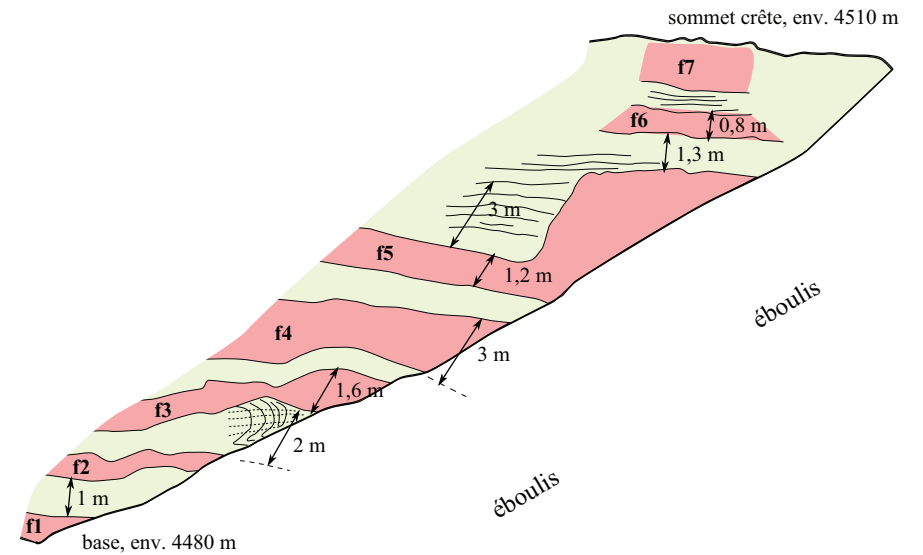
3850 m (28°38.96'N / 84°38.01'E)

dénivelée montée : 680 m

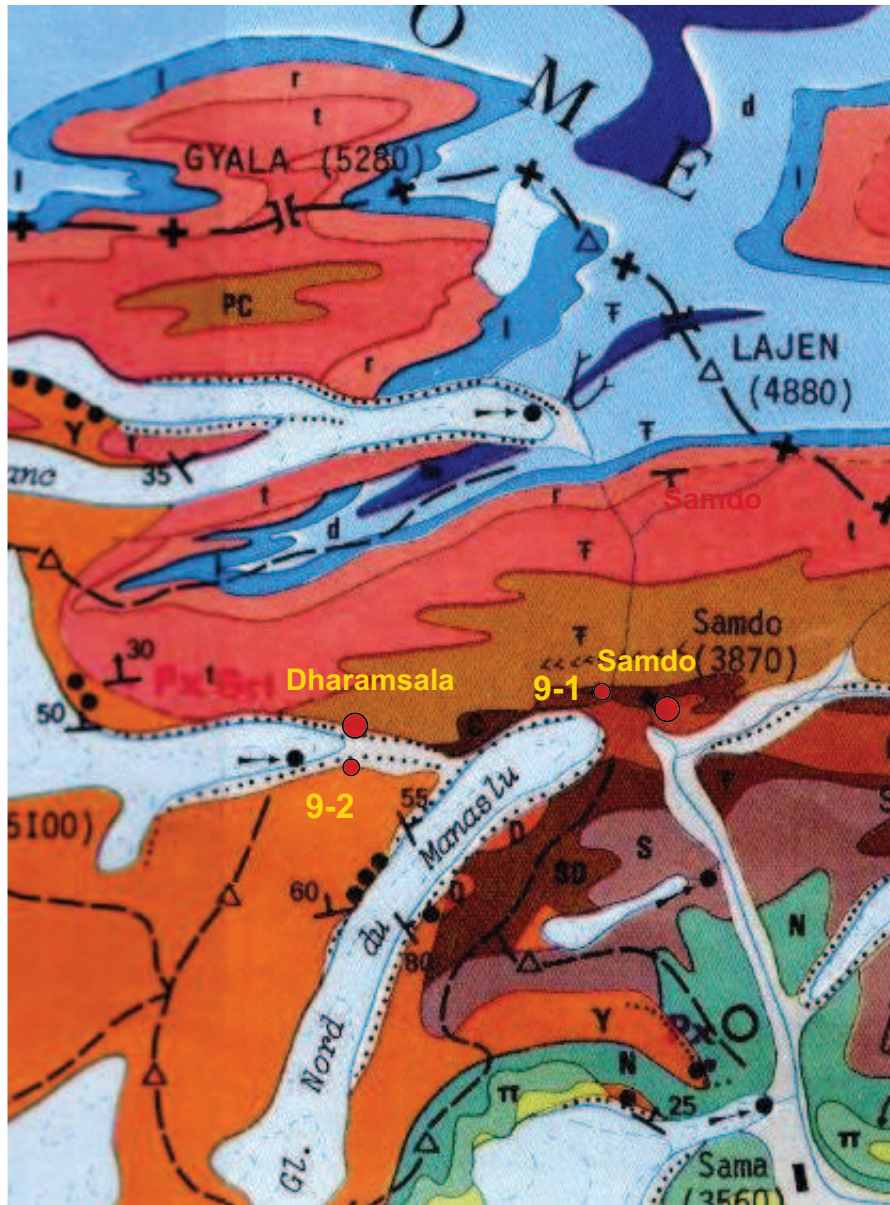
9-1 (28°39.51'N / 84°37.01'E / 4070m) La montée à Dharamsala se fait essentiellement dans des formations quaternaires (moraines et glissements). Ici, un bel affleurement de calcaires en petits lits (Carbonifère)

9-2 Affleurement RD du glacier du Larkhya, en face de Dharamsala, accessible que si le torrent du glacier se traverse facilement.

Le granite du Manaslu intrude les séries sédimentaires à différents niveaux, de la base du Paléozoïque jusqu'au Trias. En RD du Glacier du Larkhya, on est dans le Paléozoïque moyen (Siluro-Dévonien). Le contact est un peu atypique, en ce sens qu'il comporte ici tout un chevelu de filons, s'arrêtant vite quand on s'éloigne du granite.



Le schéma ci-dessus est fait d'après un croquis de terrain du contact du granite dans le Paléozoïque, RD du glacier du Larkhya (arrêt 9-2). La coupe suit sur une quarantaine de m de dénivellée le sommet de la crête RD du grand cône d'éboulis (fig. p. 77). Le granite forme à son contact un dense réseau filonien, injecté dans les calcaires métamorphiques du Paléozoïque. Les filons, en général à peu près parallèles à la schistosité de l'encaissant, sont de nature variée : f1 est une aplo-pegmatite, f2 une pegmatite à biotite, f3 une aplité à tourmaline, f5 une pegmatite, d'épaisseur variable et sécante sur la foliation, f7 qui forme tout le sommet de l'affleurement est un granite à muscovite. Les épaisseurs sont approximatives, et l'échelle non constante...

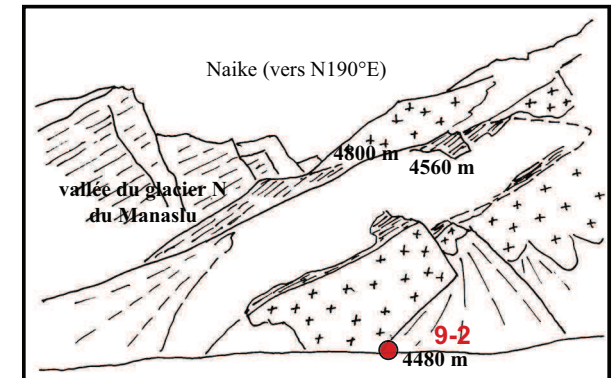


5 km



9-2 (28°39'.18' / 84°35.02' / env 4470 m)

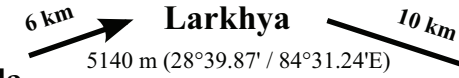
Contact du granite en RD du glacier du Larkhya. On peut suivre une zone de filons à proximité immédiate du contact du granite en remontant le cône d'éboulis (ou la croupe facile plus à gauche) au dessus du point 9-2, sur environ 40 m de dénivellée. Les altitudes indiquées sont très imprécises, mesurées à l'altimètre..



En remontant vers le Cheo, une avalanche de poudreuse en RD du glacier du Larkya



5 km



Dharamsala

4470 m (28°39.55'N / 84°35.05'E)

Larkhya

5140 m (28°39.87' / 84°31.24'E)

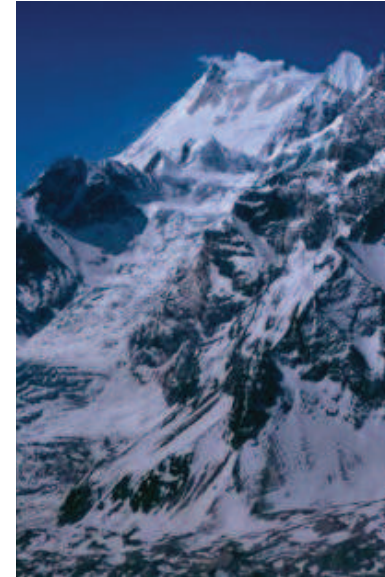
Bhintang

3725 m (28°38.05' / 84°28.27' E)

dénivelée montée : 680 m

Thème : Morphologie glaciaire - Granite du Manaslu.

Passage du Col du Larkhya, début de la longue descente de 3 jours de la Dudh Khola puis de la Marsyandi.



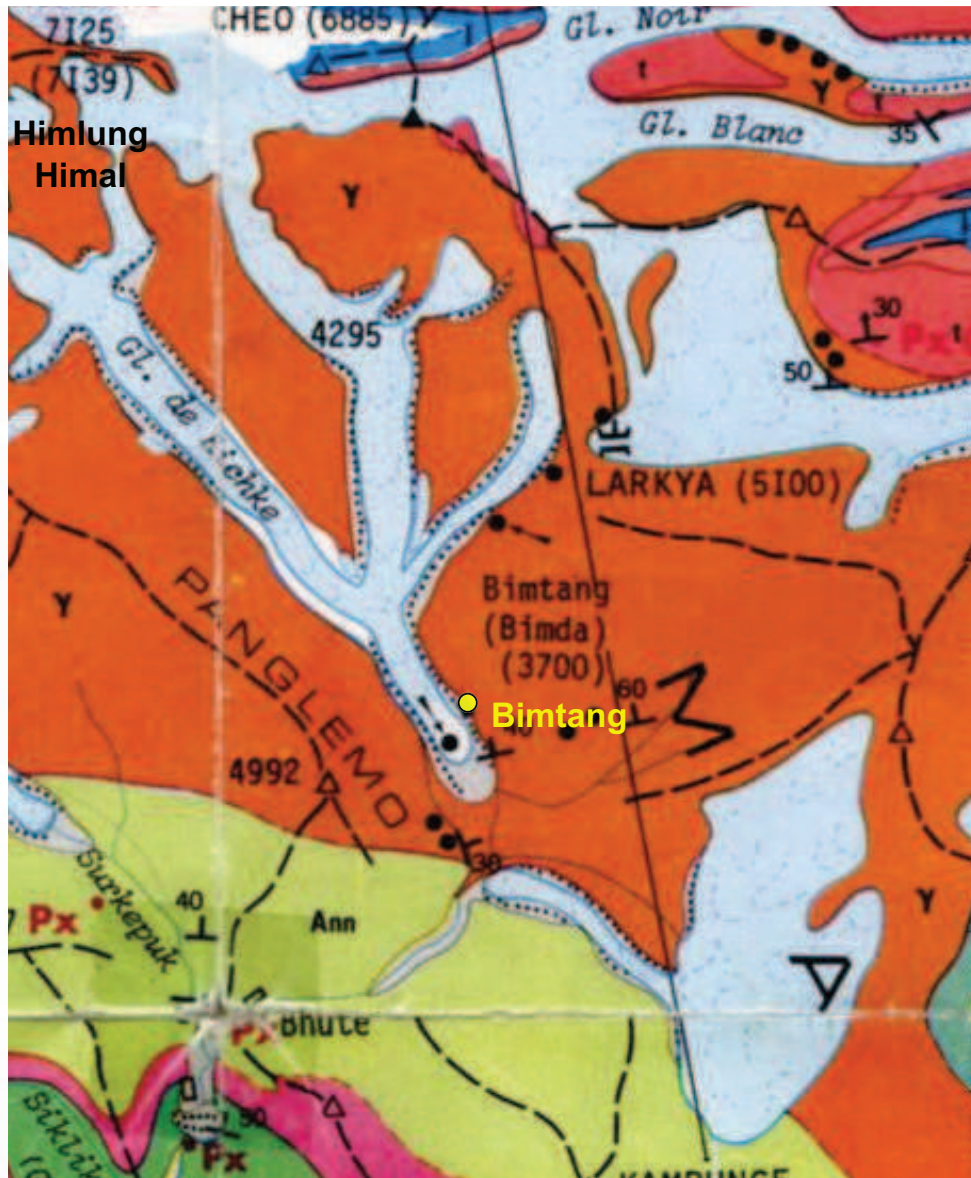
A gauche : des pentes RG du glacier du Cheo, vers le Sud, le glacier de Syanche et le sommet du Manaslu. Au premier plan, abords du col du Larkhya. Enneigement encore fort, de printemps.

10-1(28°40.05'N / 84°31.14'E / 5200, env 250m au Nord du col) - Beaux affleurements de granite du Manaslu



Au col du Larkhya, vers le Cheo Himal (6621 m)



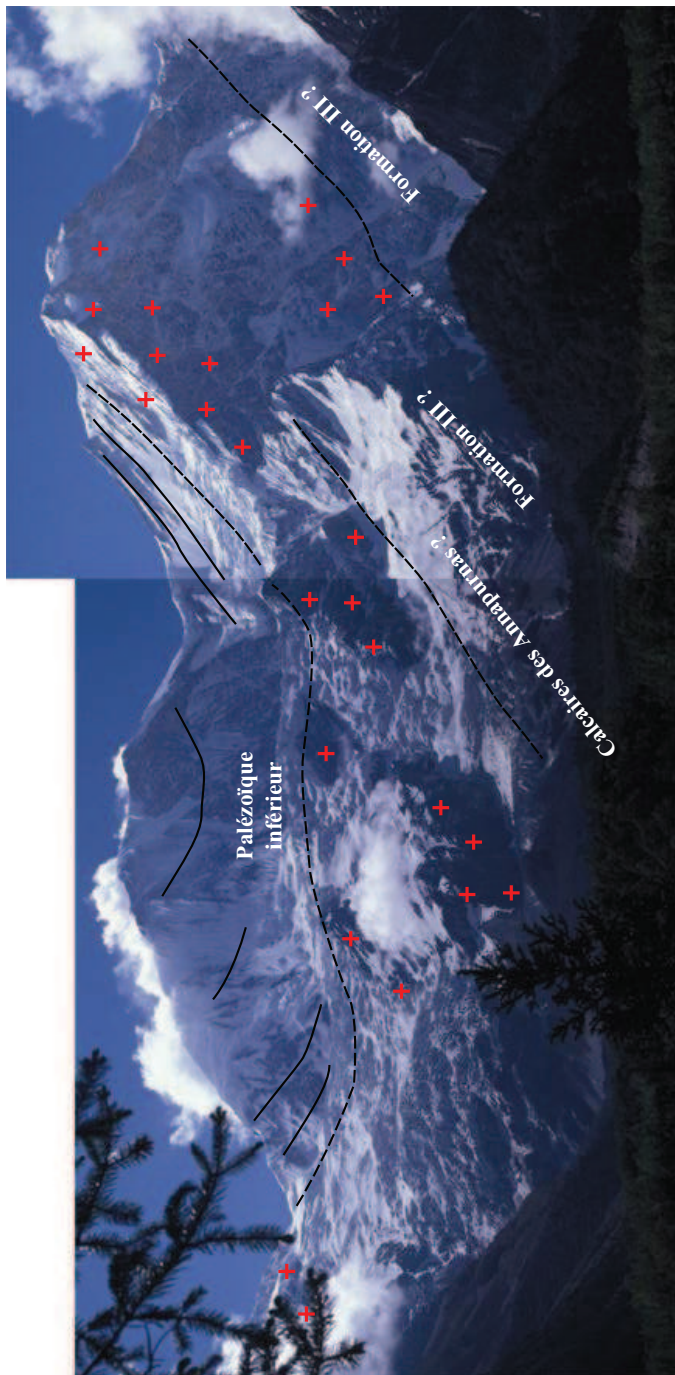


Ph. M. Fort

Les trois glaciers de Bimtang

Au premier plan, la moraine latérale à la base de laquelle se situe l'alpage de Bimtang. Le chemin de descente du Larkhya suit la crête morainique qui borde le vallon de gauche, puis le vallon lui-même. Derrière, les 3 glaciers (glacier Ouest du Larkhya ou de Salpudenda, glacier du Ponkar et glacier de Bhamdang ou Kichke) issus du bassin versant du Cheo Himal (6812 m) et de l'Himlung Himal (7126 m). Ils confluent dans le bassin de Bimtang.

A la différence des rivières qui mélangent leurs flux hydriques et solides, les glaciers restent autonomes et leurs langues se juxtaposent. Dans les angles de confluence, des lacs se sont formés. Noter que les 3 langues sont décollées du versant : il s'agit ici de glaciers froids (voir p. 64)



D'un petit peu en aval de Bimtang, on voit le magnifique versant W du Pic 7145 m (à gauche) et du Manaslu (à droite). Noter (i) que l'on peut voir ici à la fois le plancher et le toit du granite, (ii) les très nombreuses enclaves métasédimentaires dans le granite, et (iii) l'amorce du pli des Annapurnas. Détail de la partie droite page ci-contre.

On peut couper la descente en s'arrêtant une journée à Bimtang. Ici, on est dans un magnifique système de hautes vallées glaciaire, creusées au coeur du granite du Manaslu, dont on pourra trouver de très beaux échantillons dans la moraine juste en aval du village (granite à tourmaline et granite à muscovite). Un bon chemin permet d'aller au Nord de Bimtang jusqu'au lac de Ponkar, entrevu depuis la descente du col du Larkhya (ph. p. 81).



Versant W du granite du Manaslu, depuis le vallon de Bimtang, un peu en aval du village.



Détail de la partie droite de la photo ci-contre. En face W du Manaslu, on voit que le corps principal du granite est très hétérogène, fait d'un lacs d'injections se recoupant mutuellement, préservant de très nombreuses enclaves d'encaissant.



Au dessus de Bimtang, autour du lac de Ponkar

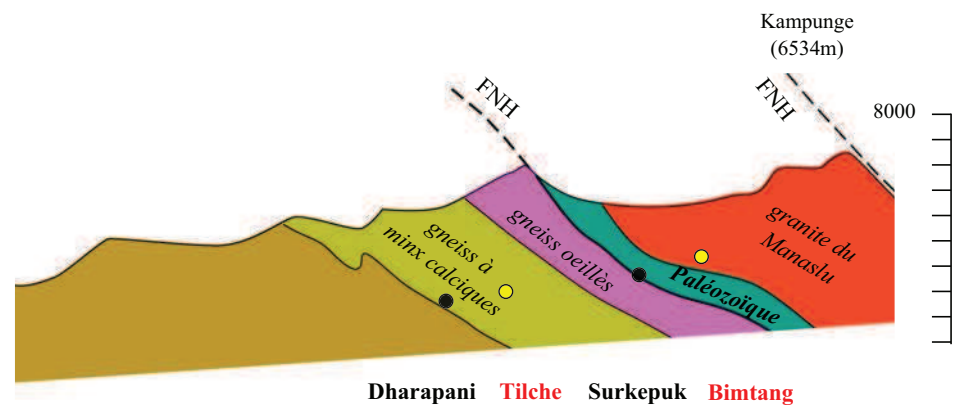
- Ci-contre, haut : au premier plan, la base complètement recouverte de moraines en partie végétalisées du glacier ouest du Larkya. Ici, il est difficile de dire s'il y a encore de la glace sous la moraine. Le lac de Ponkar est derrière la moraine claire RD du glacier. Au fond, sommet Nord-Ouest du Cheo Himal (6905 m). Juste en dessous de la crête sommitale, contact intrusif bien visible entre le granite du Manaslu, très clair (il forme la quasi totalité des cirques des 3 glaciers) et le sédimentaire du Haut Himalaya, très sombre (il s'agit probablement du Trias). Ce contact est la suite de celui vu depuis le col du Larkya dans le versant E du Cheo (ph. p. 71).
- Ci-contre, bas : pénitents de glace du glacier central (glacier de Ponkar). A l'arrière plan, le Kechakyu Himal (6530 m) et le début d l'arête menant à l'Himlung Himal (7140 m). Toute la crête est en granite du Manaslu.
- Ci-dessus, le lac de Ponkar. En arrière plan, le col du Larkya, avec à sa base le glacier ouest du Larkya (glacier de Sapudanda). Le chemin du col descend les moraines RG de ce glacier,



5 km

Bimtang 3725 m (28°38.05' / 84°28.27' E)
 env. 14 km ↘
Tilche 2240 m (28°32.83' / 84°22.94' E)
 dénivelée montée : 300 m

Thème : Du granite à la partie supérieure du CHH (gneiss oillés et gneiss calciques)
 Descente de la Dudh Khola jusqu'à un peu en amont de son confluent avec la Marsyandi. On peut continuer la descente jusqu'à Dharapani, où l'on rejoint le chemin venant de Manang (chemin du tour des Annapurnas), mais alors étape longue !



Dharapani Tilche Surkepek Bimtang



5 km

Sur cette carte ancienne, la zone de Faille Nord Himalayenne n'est pas reportée (non reconnue au moment de l'établissement de la carte, avant 1980). La carte réactualisée de P. Le Fort et S. Guillot (p.72 et 73) donne une meilleure idée de la géologie de la zone.



Si on ne s'est pas arrêté comme suggéré un jour à Bimtang, on peut faire quelques arrêts dans le début de la descente pour observer dans le paysage les contacts entre le granite du Manaslu et son encaissant (voir p. 82-83). Ci dessus, en regardant vers le Nord, sous le sommet du Cheo Himal, le contact sommital du granite intrusif dans les formations sédimentaires du Trias, très sombres. De Bimtang à Tilche, la vallée de la Dudh est très boisée jusqu'à Surkepek, et sans bons affleurements. Quelques points de repère :

12-1 (28°39.44' N / 84°28.08E), rive droite d'un petit torrent qu'il faut traverser, affleurement de granite du Manaslu, à muscovite, à grain fin

12-2(28°35.86' / 84°26.27' / 2910 m), en aval de quelques karkas (maisons de berger). Gneiss à minéraux calciques de la base des Séries Sédimentaires Tibétaines, recoupés par un filon de granite du Manaslu.

12-3 (28°35.59' / 84°25.15' / 2690 m), au nouveau village de Surkepek. C'est à ce niveau que passent les gneiss ocellés de la Formation III du Cristallin du Haut Himalaya (CHH), et donc la Faille Nord Himalayenne. Ici, des blocs de gneiss, mais pas de bons affleurements à proximité immédiate du chemin.

12-4 (28°32.83' / 84°22.94' / 2240 m), entrée du village de Tilche. Gneiss métapélitiques intercalés dans les gneiss à minéraux calciques de la Formation II du CHH.



Tilche

env 7 km

Tal

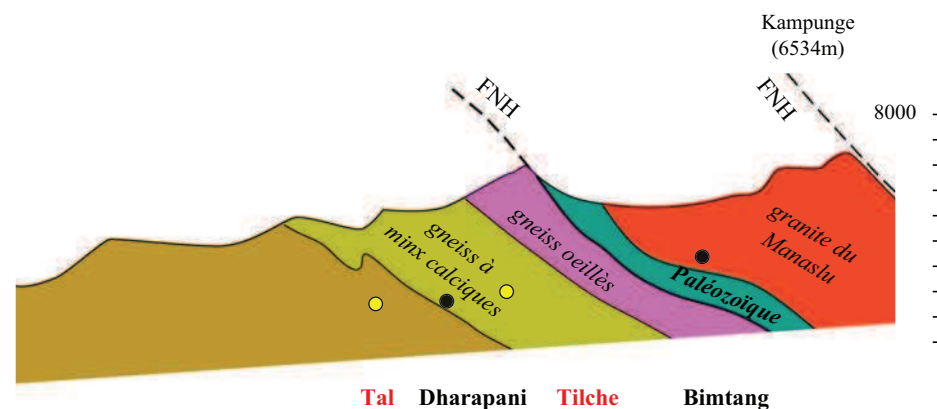
2240 m (28°32.83' / 84°22.94' E)

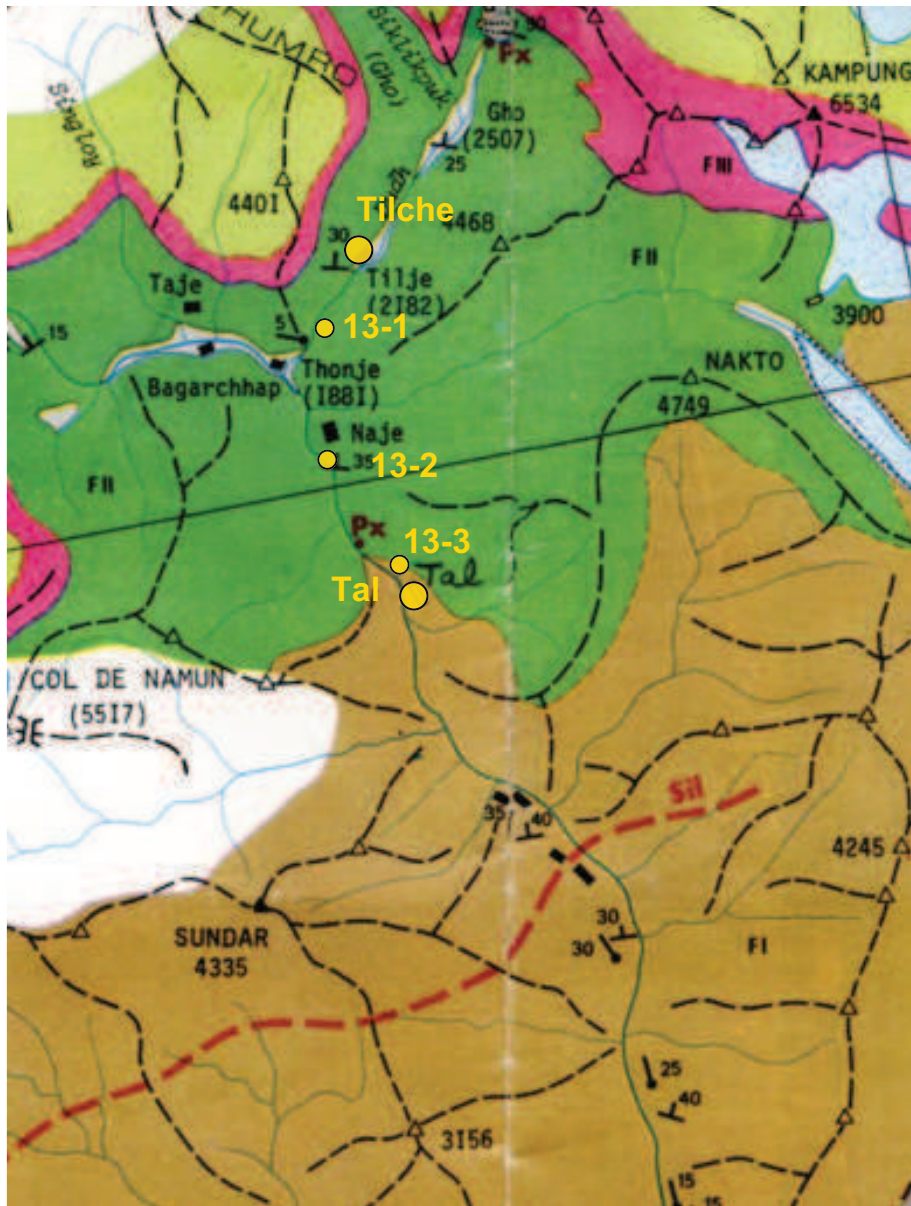
1670 m (28°28.07'N / 84°22.40' E)

dénivelée montée : 265 m

j13 (1)

Thème : Partie médiane du CHH (gneiss calciques, gneiss à sillimanite, migmatisation)
 Descente de la Dudh Khola jusqu'à Dharapani, confluent avec la Marsyandi. Ici, on rejoint le chemin venant de Manang (chemin du tour des Annapurnas), et une route jeepable en rive droite de la Marsyandi. On peut la suivre, mais il est plus agréable de continuer par l'ancien et beau chemin en rive gauche. Prendre le pont peu en aval de Dharapani.
 L'étape est assez courte, et pourrait se coupler avec la suivante; mais alors étape longue, sauf si on fait la fin en jeep (ce qui est maintenant possible).





5 km

13-1 (28°31.69' / 84°21.59' / 1970 m), RG de la Dudh, au pont avant Dharapani. Gneiss calciques de la Formation II



13-2 (28°30.05' / 84°21.84' / 1960 m) Gneiss "en plaquettes", à minéraux calciques. Etirement fort et plis demi-métriques isoclinaux déversés vers le N (mouvement de type faille normale)

13-3 (28°28.52' / 84°22.46' / 1700 m) Au Nord du village de Tal, en affleurements et dans les marches du chemin, placages de sillimanite très abondante. Cristaux blancs fibreux (ph. ci-contre), à cassures perpendiculaires à l'allongement, taille pouvant atteindre 10 cm.





5 km

Tal

1670 m (28°28.07'N / 84°22.40' E)



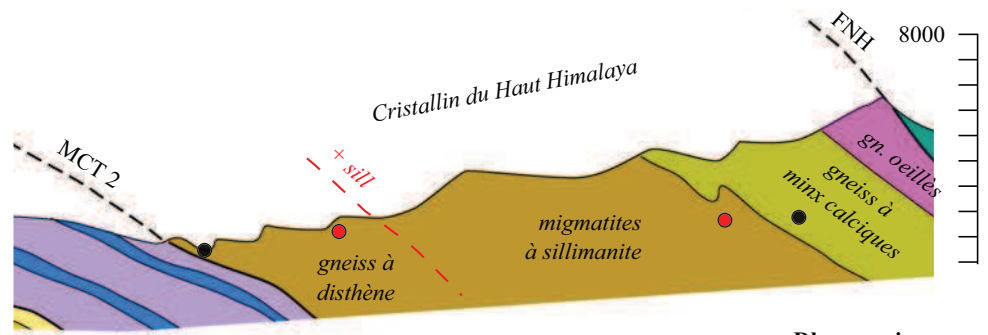
j14 (1)

Syangje

1150 m (28°23.18'N / 84°24.16' E)

dénivelée montée : 315 m

Thème : Partie médiane du CHH, gneiss à sillimanite, migmatisation

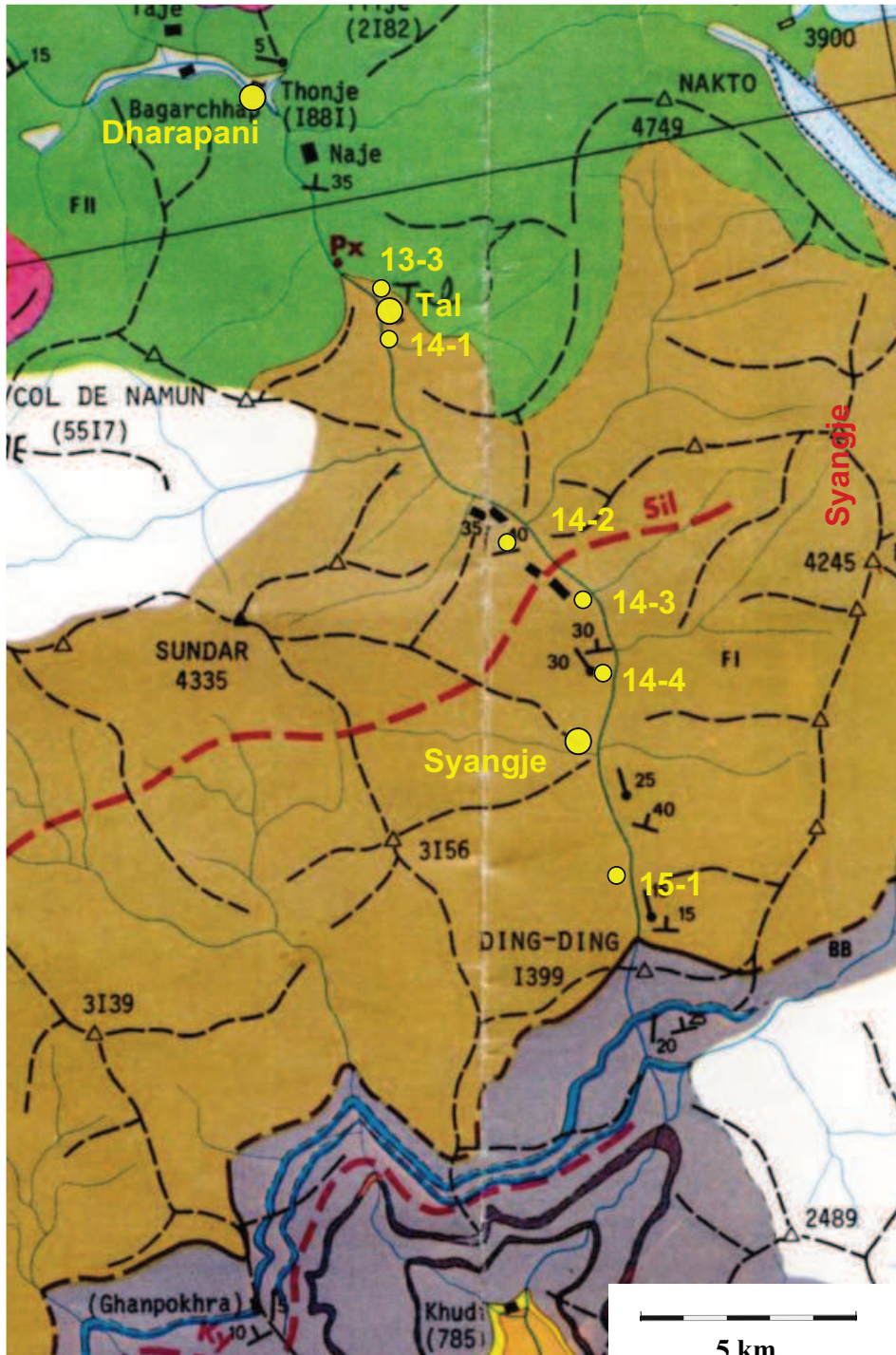


Ding Ding Syangje Tal Dharapani



Un pont à l'extrémité aval de la plaine de Tal permet de rejoindre la piste carrossable RD de la Marsyangdi. Souvent entaillée en encoffrement dans le versant raide, elle permet une coupe géologique excellente, dans de nouveaux affleurements. L'itinéraire proposé ici, moins "géologique", mais plus agréable, continue en aval de Tal en RG de la Marsyangdi jusqu'à Chamje, en descendant tout d'abord l'énorme écroulement à l'origine de la petite plaine lacustre de Tal.

Photo ci-dessus : vue vers la RD des gorges, où la construction de la route a rendu bien visible dans les gneiss à sillimanite tout un lacis de filons granitiques.



14-1 (28°27.75' / 84°22.33' / 1670 m)
 La plaine de Tal, vue vers l'amont depuis son extrémité Sud. Plaine lacustre formée derrière un gigantesque écoulement venu de la RG de la Marsyandi. Le versant reste instable, comme en témoigne l'écroulement (de taille beaucoup plus modeste) qui a recoupé la piste en été 2012 (partie droite de la photo)

14-3 (28°25.48' / 84°23.84' / 1350 m)
 De beaux gneiss à biotite-grenat



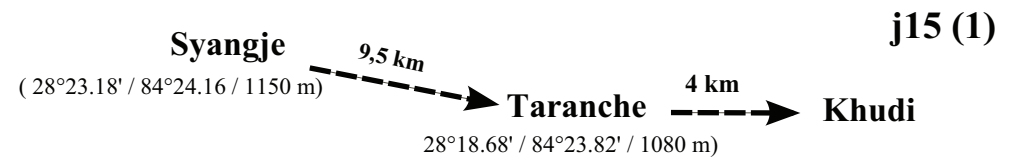
14-4 (28°25.27' / 84°24.15' / 1350 m)
 Gneiss montrant de nombreux couloirs de cisaillement très intense, pentés vers le Nord. Critère de cisaillement haut vers le Sud (ph. ci-dessous). Sans doute un grand chevauchement (MCT 3 ?) intra cristallin du Haut Himalaya



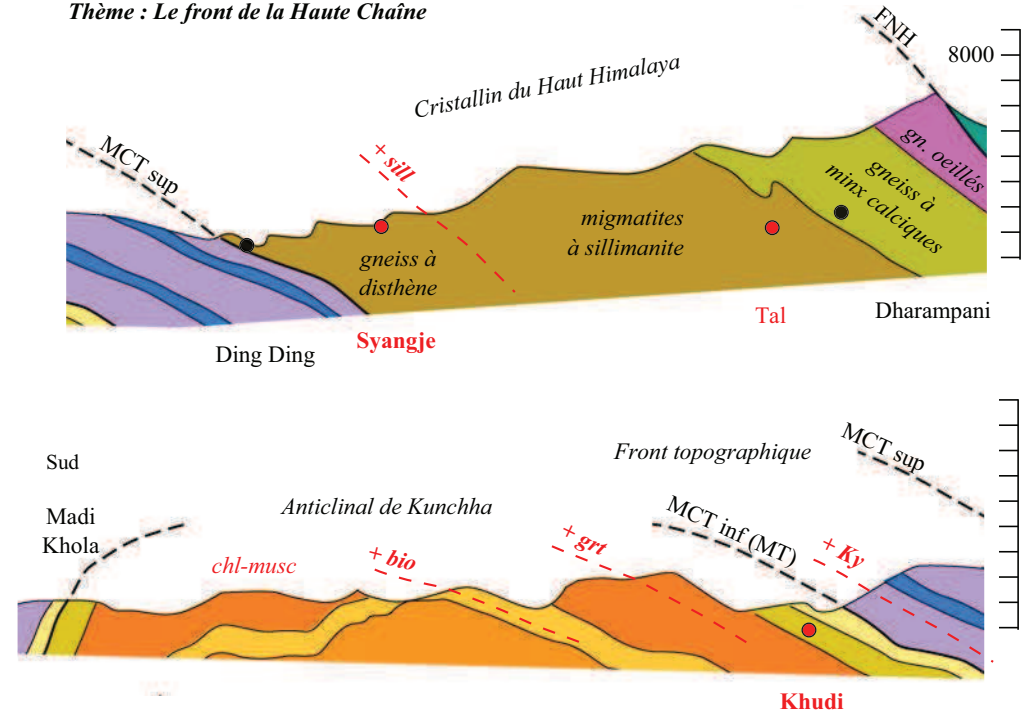
14-5 (28°24.17' / 84°24.46' / 1260 m) La piste que nous suivons depuis Chyamche (28°26.29' / 894°23.35' / 1350 m) fait une double épingle. Affleurements très frais de gneiss à biotite-grenat et staurotide (rare)



5 km

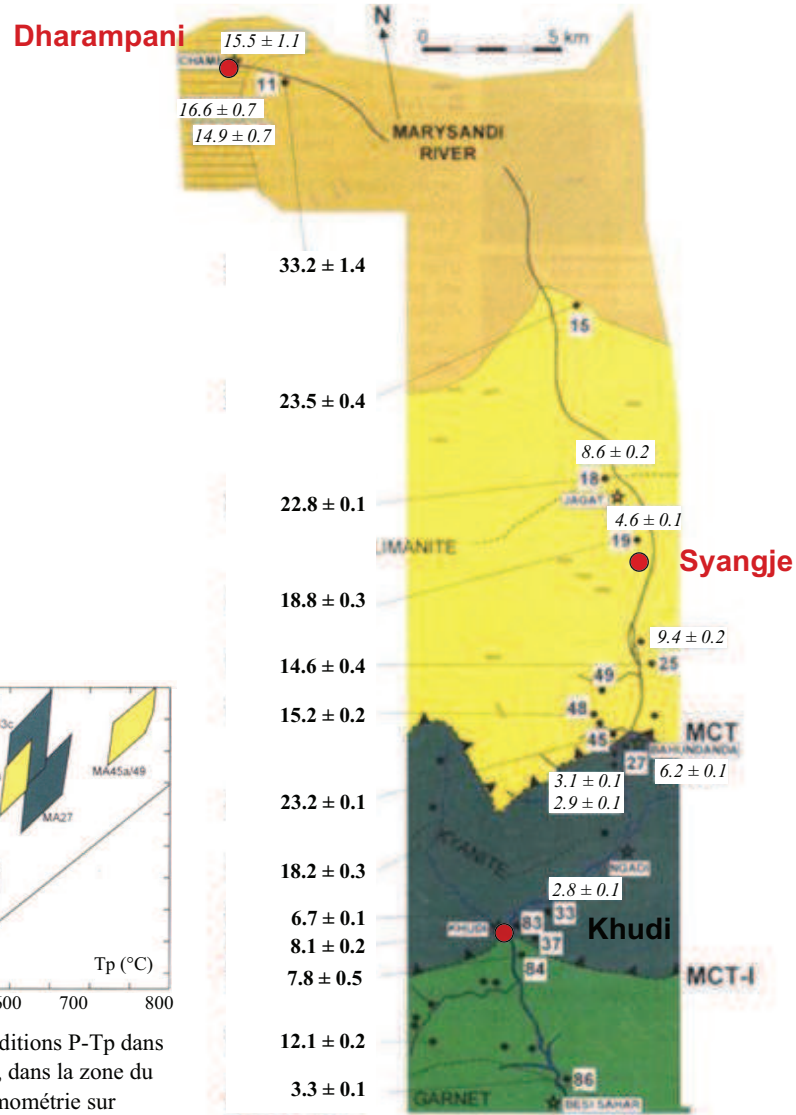


Thème : Le front de la Haute Chaîne



La descente de Syangje à Khudi se fait normalement en bus. Elle est très intéressante à au moins deux points de vue, et même si un seul arrêt spécifique est proposé, il est intéressant de faire quelques stops "paysage" ou "joli caillou"...

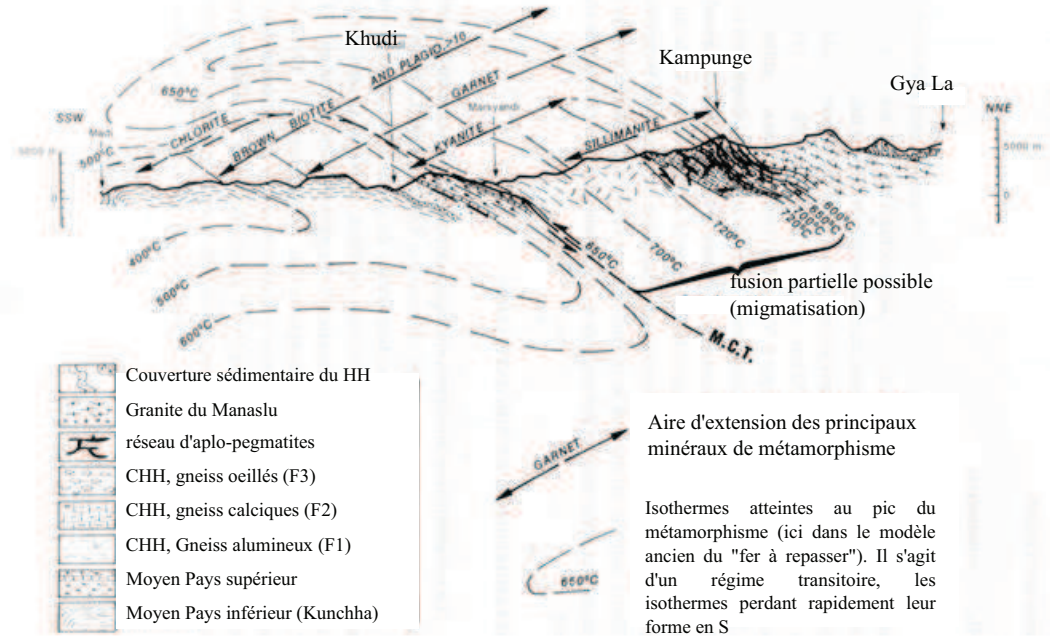
- on recoupe la zone du MCT, et son métamorphisme inverse. Pour la Marsyangdi, on dispose contrairement à la Burhi de données assez récentes sur le métamorphisme et son âge (Catlos et al., 2001, voir p. 100),
- le front topographique de la chaîne a été bien étudié (Hodges et al., 2004, voir p. 102-103). En couplant géomorphologie et thermochronologie BT, on met en évidence des mouvements quaternaires du MCT. Ceci est en bon accord avec les données sismiques, qui disent que c'est ici la zone actuellement la plus active de la chaîne.



Ci-dessus - Conditions P-Tp dans la zone à grenat, dans la zone du MCT (barothermométrie sur minéraux, Catlos et al., 2001)

Âges en Ma du métamorphisme en Marsyandi, dans le CHH et dans la zone du MCT (in Catlos et al., 2001). Âges Ar/Ar sur micas (en italique), et âges Th-Pb sur monazites (en gras). Les âges les plus anciens, loin au dessus du MCT, sont les âges restés préservés du métamorphisme M1 (structuration principale du CHH). Ces âges sont de plus en plus rajeunis quand on s'approche du MCT. En dessous du MCT (entre MCT 2 et 1, notés ici MCT et MCT-I, et sous le MCT-I), il s'agit probablement des âges du métamorphisme prograde.

Noter l'âge sur mica très jeune au N de Syangje : l'effet d'un hypothétique MCT 3 ?

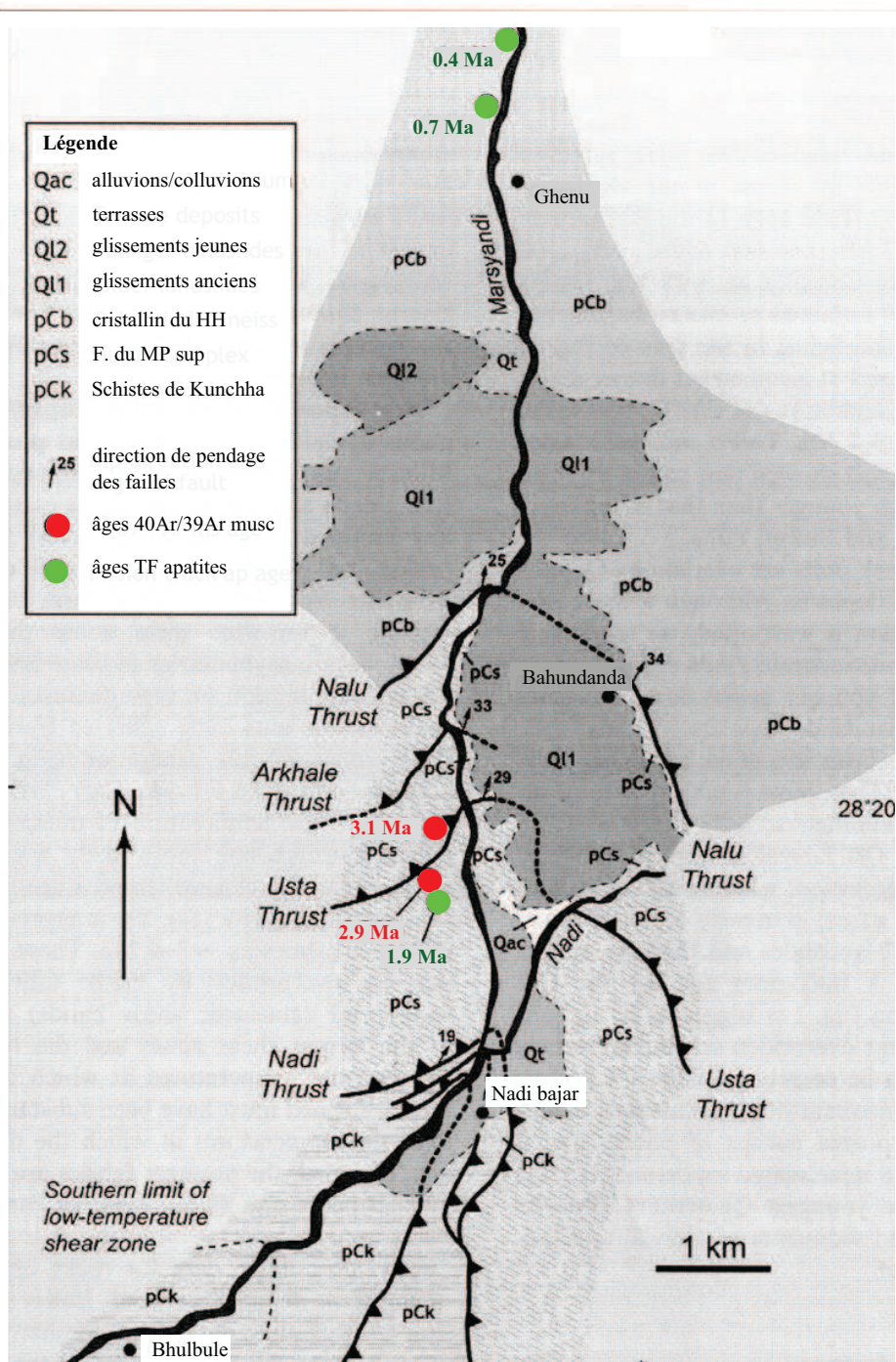


Une coupe NE - SW allant du Gya La (Nord de Samdo) à la route Kathmandou-Pokhra (Brouand, 1989). La coupe au niveau de la zone des MCT passe par la Marsyandi. Noter ici comme en Burhi le "métamorphisme inverse".

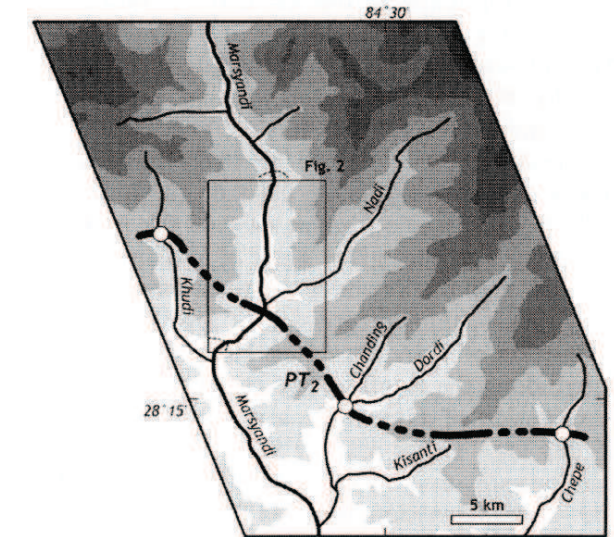


15-1 (28°21.81' / 84°24.16' / 1070 m) Dans les affleurements frais le long de la piste, gneiss à biotite - grenat - staurolite. Base du Cristallin du Haut Himalaya, peu au dessus du MCT 2.

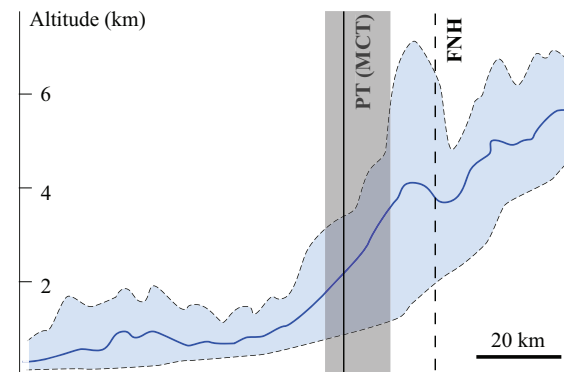
Le front morphologique du Haut Himalaya



Carte géologique simplifiée de la zone de transition morphologique Haut Himalaya - Moyen Himalaya en Marsyandi (front morphologique). Le Nalu Thrust correspond au MCT sup (MCT 2), le Nadi Thrust au MCT inf (MCT 1, Munsiri Thrust), à la base de la zone du MCT (Hodges et al., 2004).



Au SW du Manaslu, le front morphologique de la Haute Chaîne calé en utilisant les ruptures de pentes dans les principales rivières (marquées par les cercles blancs). Le cadre correspond à la carte de détail ci-contre (Hodges et al., 2004)



Le front de la Haute Chaîne (d'après Hodges et al., 2004). En bleu pâle, topographie max et min sur une bande d'environ 50 km de part et d'autre de la Marsyandi. Trait bleu : profil moyen. PT : front morphologique. Bande grise : limites de la zone de déformation quaternaire. FNH : zone de faille Nord Himalayenne. On voit qu'elle se situe à la limite N de la Haute Chaîne morphologique (rejeu quaternaire ?)

En descendant la Marsyandi, on passe un verrou topographique net entre Bahundanda et Nadi Bazar. C'est la limite morphologique entre Haut et Bas Himalaya, appelée par Hodges et al. (2004) la "physiographic transition" (PT). Elle correspond à la zone du MCT, dont le jeu principal est rappelons-le Miocène. Le creusement de la nouvelle route de la Marsyandi a permis une nouvelle cartographie des formations quaternaires et a révélé plusieurs traces de chevauchements quaternaires. Ces données, complétées par des datations Ar/Ar sur muscovite et traces de fission sur apatite montrent que ce front morphologique est dû au fonctionnement de la zone du MCT jusqu'à aujourd'hui (ou à sa reprise au Quaternaire).

Une grille pétrogénétique adaptée aux roches métapélitiques (à Fe-Mg et riches en Al)

Il existe de nombreuses techniques pour retrouver les conditions P-Tp par lesquelles est passée une roche métamorphique. L'une des plus classiques et des moins sophistiquées : utiliser les courbes d'équilibre entre minéraux, reportées dans un diagramme de phase P-Tp (on parle de "grille pétrogénétique").

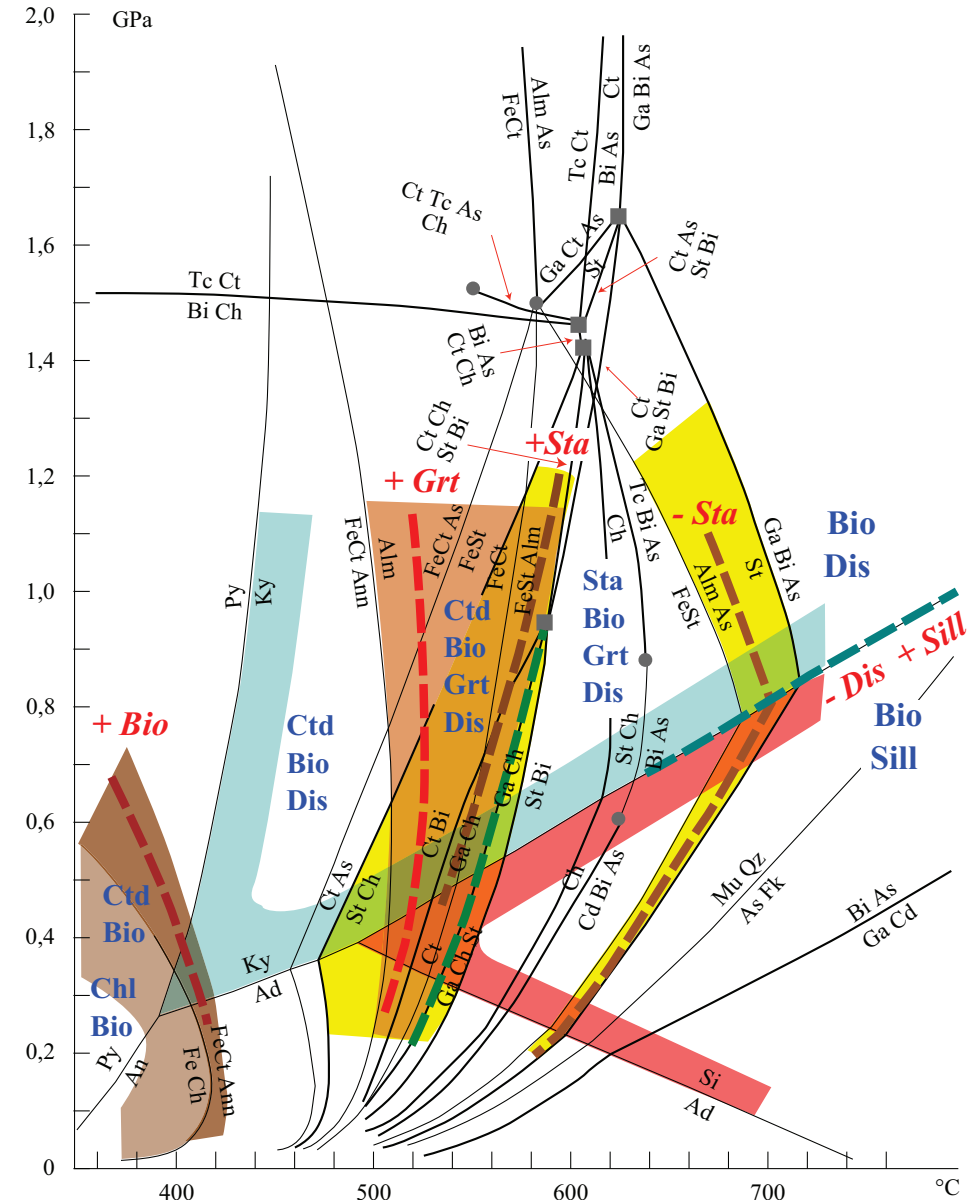
La figure ci-contre montre une grille adaptée aux minéraux usuels qui apparaissent dans le métamorphisme des roches alumineuses (micaschistes, et gneiss micassés). Elle paraît compliquée au premier abord, et pourtant elle est **établie pour un système chimique très simplifié**, où seuls sont pris en compte les éléments suivants : K, Fe, Mg, Al, Si, H et O (système KFMASH).

Dans cette grille, on a reporté toutes les réactions d'équilibres possibles entre les minéraux représentables dans ce système : ce sont les minéraux ferro-magnésiens (minéraux classiques du métamorphisme des roches argileuses et ferro-magnésiennes : biotite, grenat, staurotide...), la pyrophyllite et les polymorphes de SiAl₂O₅ (sillimanite, andalousite, disthène).

Remarques

- certains éléments chimiques qui peuvent modifier significativement l'étendue du champ de stabilité de certains minéraux ne sont pas pris en compte. C'est par exemple le cas du Mn, qui abaisse beaucoup la Tp d'apparition du grenat,
- les possibilités d'apparition ou de disparition d'un minéral donné sont en général multiples (par exemple, 4 réactions produisent du staurotide du coté haute température),
- les équilibres minéralogiques réellement observés dans une roche dépendent beaucoup de la chimie globale de celle-ci, ce qui est impossible à visualiser sur ce type de diagramme,
- le diagramme présenté ici est adapté au métamorphisme MP-MT. Les réactions "basse pression" mettant en jeu la cordiérite ne sont pas représentées (sauf deux, celles de déstabilisation de la chlorite puis de la biotite dans le champ de la sillimanite). A l'opposé, les réactions typiques du métamorphisme "haute pression" mettent en jeu des minéraux sodiques (albite, glaucophane, jadéite), et n'apparaissent donc pas dans ce diagramme,
- cette grille est adéquate pour fixer des températures, mais moins pour fixer des pressions (réactions peu sensibles à la pression, en dehors de l'équilibre disthène-sillimanite).

On a cependant essayé de placer quelques limites d'apparition des minéraux pour des chimismes de roches métamorphiques banales, pour caler les "isogrades" que nous verrons sur le terrain : on voit qu'il ne s'agit pas de lignes, mais plutôt de bandes épaisses !



Grille P-Tp pour des pélites, dans le système KFMASH (d'après Spear, 1993, simplifié)

Minéraux : Alm, almandin - An, andalousite - Ann, annite - As : andalousite, disthène ou sillimanite indifférenciées - Bi, biotite - Cd, cordiérite - Ch, chlorite - Ct, chloritoïde - Fk, feldspath K - Ga, grenat - Ky, disthène (kyanite) - Mu, muscovite - Py, pyrophyllite - St, staurotide - Tc, talc



En RG de la Bhuri Gandaki (position : 28°31.64' / 84°50.44 / 1820 m), environ 1 km en aval de Ghap, un glissement de terrain de faible ampleur, qui venait de se produire fin Octobre 2011. De tels glissements actifs sont extrêmement fréquents dans tout l'Himalaya, où ils coupent régulièrement chemins et routes. Ils se déclenchent (ou se remobilisent) après presque chaque épisode de pluie.

Références pour la géologie du Quaternaire

Ci-dessous une liste de références pour ce qui concerne la géologie du Quaternaire et les glaciers himalayens. Les références pour la géologie du bed-rock sont données p. 110

- Bajracharya, S. & Mool, P. 2009. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50(53): 81-86.
- Bolch, T., Kulkarni, A., Kääb, A., Huggel, C., Paul, F., Cogley, J.G., Frey, H., Kargel, J.S., Fujita, K., Scheel, M., Bajracharya, S., Stoffel, M. 2012. The State and Fate of Himalayan Glaciers. *Science* 336: 310-314.
- Dahal, R.K. & Hasegawa, S. 2008. Representative rainfall thresholds for landslides in the Nepal Himalaya. *Geomorphology*, 100: 429-443.
- Fort M., 1979. La Haute Vallée de la Buri Gandaki. Etudes sur le Quaternaire de l'Himalaya. Editions du CNRS, Paris. 236 p.
- Fort, M. 1987. Sporadic morphogenesis in a continental subduction setting: an example from the Annapurna Range, Nepal Himalaya. *Zeitschrift für Geomorphologie Supplementband NF*, 63: 9-36
- Fort, M. 2000. Glaciers and mass wasting processes: their influence on the shaping of the Kali Gandaki valley (Higher Himalaya of Nepal). *Quaternary International*, 65/66: 101-119
- Fort, M., Cossart E. et Arnaud-Fassetta G. 2010. Hillslope-channel coupling in the Nepal Himalayas and threat to man-made structures : the middle Kali Gandaki valley. *Geomorphology*, 124, 178-199.
- Fort, M. 2011. Two large late Quaternary rock slope failures and their geomorphic significance, Annapurna Himalayas (Nepal). *Geografica Fisica e Dinamica Quaternaria*, 34 (1): 5-16.
- Starkel, L. 1976. The role of extreme (catastrophic) meteorological events in the contemporary evolution of slopes. In : Derbyshire, E. (ed.), *Geomorphology and climate*, Chichester, J. Wiley, pp. 203-241.

Les mouvements de terrain sont omni-présents en Himalaya. En effet, les fortes pentes favorisent toute forme d'instabilité dès que l'on dépasse un certain angle d'équilibre ($32^{\circ} \pm 2^{\circ}$) ; or l'incision active des rivières en réponse à la surrection himalayenne entretient un raidissement, donc un déséquilibre permanent à la base des versants.

(1) À plus de 90%, les instabilités de versants himalayens sont déclenchées suite à une saturation hydrique des terrains liée aux fortes précipitations de mousson ; au niveau du front de la Haute Chaîne, on peut même dépasser 5000 mm/an. La pression interstitielle de l'eau, qui occupe tous les pores du matériau, l'alourdit, augmente la composante gravitaire et provoque ainsi la rupture et la mise en mouvement de la couverture meuble du versant. Le montant de précipitation nécessaire au déclenchement du mouvement reste un sujet de discussion, car il est difficile d'isoler ce paramètre des autres facteurs favorables (exposition et valeur de la pente, nature des minéraux phylliteux, densité de fracturation des roches, ampleur et morphologie générale du versant...).

Trois paramètres sont particulièrement importants : le seuil de précipitation, le cumul et l'historique des pluies (Starkel 1976 ; Dahal & Hasegawa, 2008). Lors de la séquence pluvieuse, le seuil de précipitation susceptible de déclencher des mouvements de terrain varie selon les événements observés : de 100 mm à 260 mm/24h. Par ailleurs, un cumul de pluie de >350 mm en 3 jours serait suffisant pour déclencher les glissements. Enfin, la combinaison de pluies journalières d'au moins 144 mm et de pluies antérieures, cumulées sur plusieurs jours voire plusieurs mois, augmenteront la pression hydrostatique des terrains jusqu'au point de rupture. Il n'est donc pas étonnant de constater que c'est surtout en fin de période de mousson, lorsque les terrains sont saturés, que se produisent préférentiellement les mouvements de terrain, même si des événements extrêmes hors saison peuvent se produire, par exemple lors des orages printaniers.

(2) L'autre grand facteur déclenchant est la sismicité, avec des conséquences qui peuvent être particulièrement dramatiques (cf. les séismes du Cachemire en 2005, et du Sichuan en 2008). En Himalaya, les mouvements de terrain les plus volumineux ($>10^9 \text{m}^3$), pour la plupart d'âge préhistorique, ont sans doute été déclenchés par des tremblements de terre, comme dans le bassin de Pokhara ou sur les contreforts du Dhaulagiri ou de l'Annapurna (Fort, 1987 ; 2000 ; 2011). Même si leurs effets (blocage de vallées, réorganisation du réseau hydrographique) se font encore sentir plusieurs milliers d'années après, le rôle de ces méga-séismes destructeurs ($M_w > 7,5$) n'a pourtant rien de comparable en terme de fréquence avec la périodicité annuelle de la mousson, et il est de fait souvent difficile d'établir une corrélation nette entre sismicité moyenne et déclenchement de mouvements de terrain. Dans la majorité des cas ($M_w < 5$), les séismes doivent plutôt être considérés comme des facteurs préparatoires (fissuration des roches), favorisant l'infiltration des eaux et les ruptures brutales de versants lors des moussons suivantes.

(3) Un autre facteur déclenchant est de plus en plus invoqué pour les zones de haute montagne : avec la fonte des glaciers, la fonction de « contrefort » exercée par les langues glaciaires à la base des versants raidis disparaît, ce qui crée un relâchement des contraintes. Cette réaction, appelée « paraglaciale », se traduit par des écroulements pouvant affecter des parois rocheuses entières.

(4) Enfin, la remontée de l'isotherme 0°C en altitude peut aussi amener à la fusion du pergélisol rocheux et à l'occurrence d'écroulements rocheux, comme cela a été récemment mis en évidence dans les Alpes.

Annexe 4

Légende de la carte géologique Annapurnas-Manaslu-Ganesh

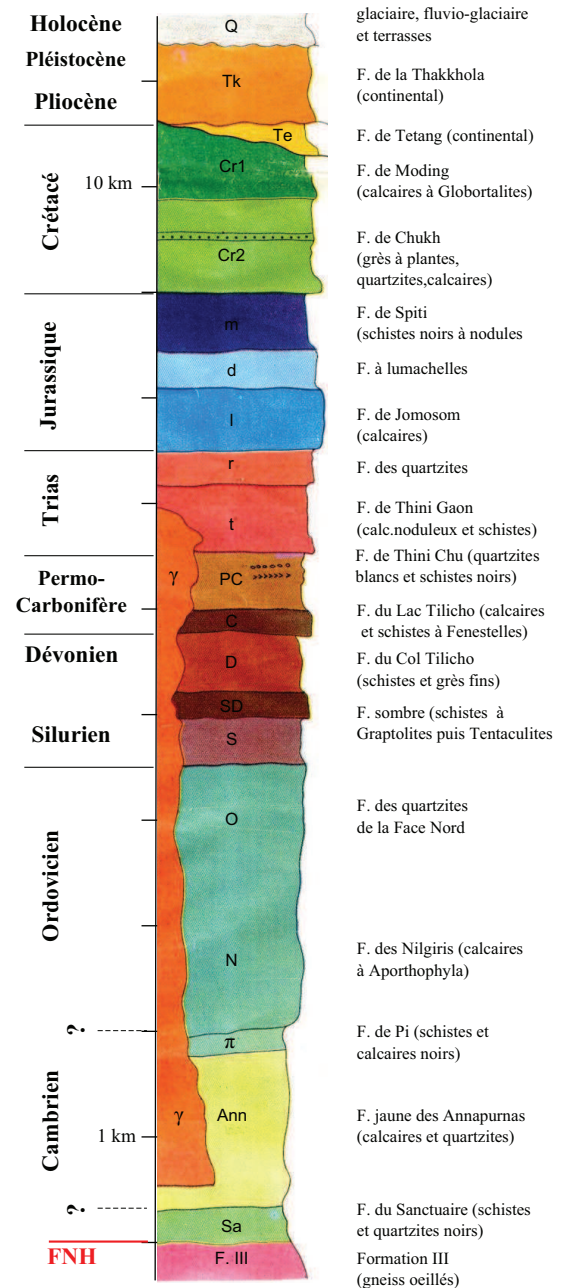
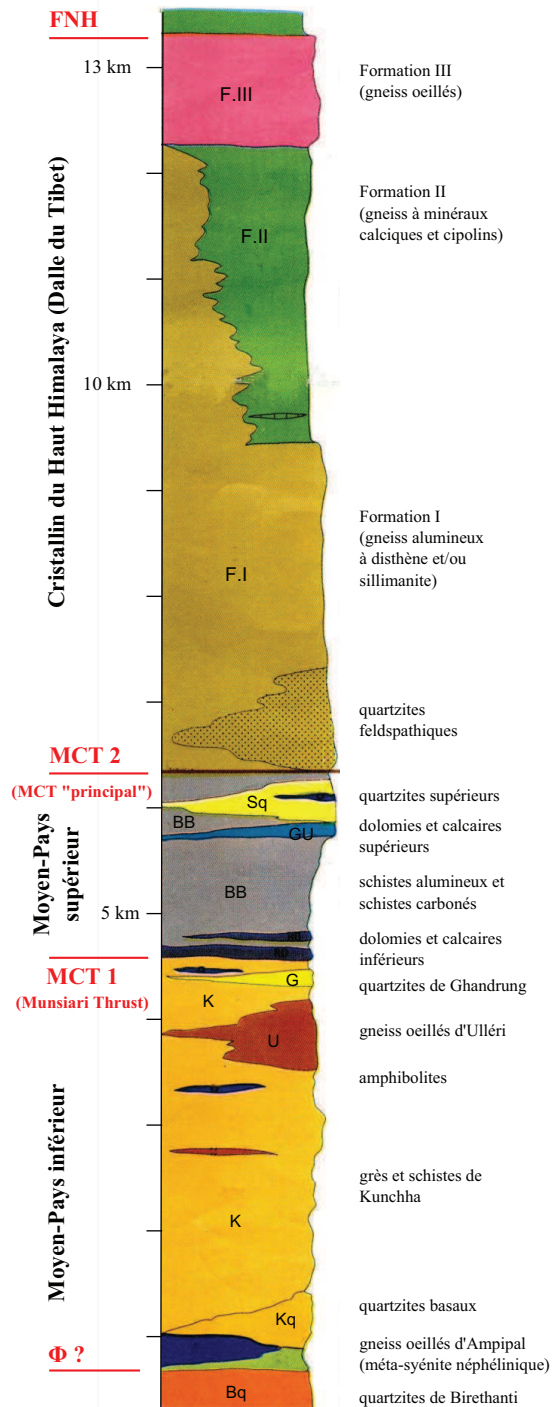
Colchen et al., 1980

Trois zones d'accident majeur ont été soulignées en rouge :

- La FNH (Faille Nord Himalayenne), parfois dédoublée,
- Les chevauchements principaux de la zone du MCT. L'ensemble des auteurs est maintenant d'accord pour dire qu'il existe deux chevauchements importants : à la base du Cristallin du Haut Himalaya (CHH) et entre la Formation Supérieure et la Formation inférieure du Moyen Pays, à la base de la zone de cisaillement du MCT. Mais une certaine inhomogénéité existe d'un auteur à l'autre sur leur nomenclature. Le MCT "principal", qui sépare CHH et Moyen Pays, est appelé soit MCT 1, soit plus souvent MCT 2 (comme nous l'avons fait sur le log ci-contre). Le chevauchement inférieur (alors appelé MCT 1) est l'équivalent du Munsiri Thrust (MT), défini plus à l'Ouest, au Garhwal.

- Un chevauchement probable à la base du MP inférieur, l'ensemble MP Supérieur et Inférieur étant aussi appelé Nappe (ou Unité, Groupe) de Nawakot.

Signes structuraux	Métamorphisme
	Bio Biotite
	Chl Chloritoïde
	Ky Disthène (kyanite)
	Grt Grenat
	Hb Hornblende
	Px Pyroxène
	Sil Sillimanite
	Sta Staurotide
	Wol Wollastonite



Ce livret-guide est la refonte d'un livret-guide réalisé avec l'aide de S. Guillot et J. Déclaron pour un tour du Manaslu effectué automne 2011, repris automne 2012 avec l'aide de Monique Fort (étapes et arrêts modifiés à partir des expériences de 2011 et 2012, géologie du Quaternaire complétée par MF).

La littérature himalayenne est très abondante. Ne sont indiqués ici que les articles et ouvrages dont nous avons extrait ou adapté des figures. L'ouvrage récent de Mascle et al., 2010 constitue un bon ouvrage de référence récent en français. Les références concernant le Quaternaire sont données p. 106

Avouac (2007) - Dynamic processes in extensional and compressional settings – Mountain building: from earthquakes to geological deformation. *Treatise on Geophysics, Vol 6 (Crust and Lithosphere Dynamic)*, p. 378-432, Elsevier pub.

Beaumont, C., Jamieson, R.A., Nguyen, M.H. et Lee, B. (2001) - Himalayan tectonics explained by extrusion of low-viscosity crustal channel coupled to focused surface denudation. *Nature*, 414, 738-742.

Beaumont, C., Jamieson, R.A., Medvedev, S. et Nguyen, (2004) - Crustal channel flow : numerical models with applications to the tectonics of the Himalayan-Tibetan orogen. *J. Geophys. Res.*, 109

Beysac, O., Bollinger, L., Avouac, J.P. et Goffé, B. (2004) - Thermal metamorphism in the Lesser Himalaya of Nepal determined from Raman spectroscopy of carbonaceous material. *EPSL*, 225, 233-241.

Bollinger, L., Avouac, J.P., Cattin, R. et Pandey, M.R. (2004) - Stress build up in the Himalaya. *J.G.R.*, 109, B11405

Bollinger, L., Avouac, J.P., Beysac, O., Catlos, E.J., Harrison, M., Grove, M., Goffé, B. et Sapkota, S. (2004) - Thermal structure and exhumation history of the Lesser Himalaya in central Nepal. *Tectonics*, 23, TC5015, 19 p

Bollinger, L., Henry, P. et Avouac, J.P. (2006) Mountain building in the Nepal Himalaya : thermal and kinematic model. *EPSL*, 244, 58-71.

Brouand (1989) - Pétrogenèse des migmatites de la Dalle du Tibet (Himalaya du Népal). *Thèse, Nancy*, 161 p. + annexes

Catlos, E.J., Harrison, M., Kohn, M.J., Griove, M., Ryerson, F.J., Manning, C.E. et Upreti, B. (20001) - Late Geochronologic and barothermometric constraints on the evolution of the Main Central Thrust, Central Nepal Himalaya. *J. Geophys. Res.*, 16, 16.177-16.204.

Colchen, M., Le Fort, P. et Pêcher, A. (1980) - Carte géologique Annapurnas - Manaslu - Ganesh, Himalaya du Népal. Carte à l'échelle de 1:200 000 et notice explicative - *Ed. du CNRS, Paris*

Dobremez, J.F. (1972) - Le Népal, Ecologie et Phytogéographie. *CNRS, Cahiers Népalsais (épuisé)*

France-Lanord, C., Sheppard, S.M.F. et Le Fort, P., (1988) - Hydrogen and oxygen isotope variations in the High Himalaya peraluminous Manaslu leucogranite : evidence for heterogeneous sedimentary source. *Geochemica Cosmochimica Acta*, 52, 513-526.

Grujic, D. (2006) - Channel flow and continental collision tectonics : an overview. *Geol. Soc. London Sp. pub.* 268, 25-37.

Guillot, S. (1993) - Le granite du Manaslu (Népal Central), marqueur de la subduction et de l'extension intracontinentale himalayenne. *Thèse, Grenoble, Géol. Alpine* 19, 97 p.

Guillot, S., Hodges, K., Le Fort, P. et Pêcher, A. (1994) - New constraints on the age of the Manaslu leucogranite : evidence for episodic tectonic denudation in the central Himalayas. *Geology*, 22, 559-562.

Guillot, S. et Le Fort, P. (1995) - Geochemical constraints on the bimodal origin of High Himalayan leucogranites. *Lithos*, 35, 221-234.

Guillot, S., Le Fort, P., Pêcher, A., Roy Barman, M. et Aprahamian, J. (1995) - Contact metamorphism and depth of emplacement of the Manaslu granite (central Nepal). Implications for Himalayan orogenesis. *Tectonophysics*, 241, 99-119.

Harrison, T.M., McKeegan, K.D. et Le Fort, P. (1999) - Detection of inherited monazites in the Manaslu leucogranite by 208Pb/232Th ion microprobe dating : crystallization age and tectonic implications. *EPSL*, 133, 271-282.

Hodges, K., Wobus, C., Ruhl, K., Schildgen, T. et Whipple, K. (2004) - Quaternary deformation, river steepening, and heavy precipitation at the front of the Higher Himalayan ranges. *EPSL*, 220, 379-389.

Khon, M.J. (2004) - P-T-t data from Central Nepal support critical taper and repudiate large scale channel-flow of the Greater Himalaya Sequence. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 120, 259-273.

Le Fort, P. (1975) - Himalaya : the collided range. Present knowledge on the continental arc. *Am. J. Sc.*, 275A, 1-44

Le Fort, P. et Guillot, S. (1999) - Expédition Himlung Himal 1997 - Une carte géologique du Manaslu. *Plaquette du Comité Scientifique de la Fédération des Clubs Alpains Français*

Mascle, G., Pêcher, A. et Guillot, S. (2010) - Himalaya - Tibet. La collision continentale Inde - Eurasie. *Vuibert*, 250 p.

Pandey, M.R., Tandukar, R.P., Avouac, J.P., Vergne, J. et Héritier, T. (1999) - Seismotectonic of the Nepal Himalaya from a local seismic network. *J. Asian Earth Sc.*, 17, 703-712.

Polunin et Stainton (2010) - Flowers of the Himalayas. *Oxford University, 11ème éd.*

Rey, P. *Site WEB* (<http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/>)

Searle M. et Godin, L. (2003) - The South Tibetan detachment and the Manaslu leucogranite : a structural reinterpretation and restoration of the Annapurna-Manaslu Himalaya, Nepal. *J. of Geology*, 111, 505-523

Searle M. et Szulc, A. (2005) - Channel flow and ductile extrusion of the High Himalaya slab : the Kangchenjunga-Darjeeling profile, Sikkim Himalaya. *J. Asian Earth Sc.*, 25, 173-185

Upreti, B. N. (1999) - An overview of the stratigraphy and tectonics of the Nepal Himalaya. *J. Asian Earth Sc.*, 17, 577-606

Carte utilisée pour visualiser l'itinéraire : Trekking map "Around Manaslu", 1/110 000. Shangri La map, Ed Altitudes des sommets : cartes topographiques au 1 : 50 000e népalaises, très bonnes et en vente libre
Position des arrêts : coordonnées GPS mesurées en 2011 et 2012. Elles sont bonnes en latitude et longitude, mais plus imprécises en altitude.

Sommaire

Introduction

Carte de l'itinéraire	1
Les grandes lignes de la géologie de l'Himalaya	2
L'Himalaya - Tibet actuel	6
Carte géologique de la zone Marsyandi-Burhi	8
Coupes géologiques de la Marsyandi et de la Burhi Gandaki	11

Le trek, jour par jour

J0 - De Kathmandou à Arughat (bus)	12
J1 - Burhi Gandaki, d'Arughat à Lapubesi	18
J2 - Burhi Gandaki, de Lapubesi à Dobhan	22
J3 - Burhi Gandaki, de Dobhan à Philim	30
J4 - Burhi Gandaki, de Philim à Bihi	36
J5 - Burhi Gandaki, de Bihi à Lihi	42
J6 - Vallée de Hinang (Himal Chuli)	50
J7 - Burhi Gandaki, de Lihi à Samagaon	52
J8 - Burhi Gandaki, de Samagaon à Samdo	58
J9 - Vallée du Larkhya, de Samdo à Dharamsala	74
J10 - Col du Larkhya, de Dharamsala à Bimtang	78
J11 - Autour de Bimtang	82
J12 - Dudh khola, de Bimtang à Tilche	86
J13 - Marsyandi, de Tilche à Tal	90
J14 - Marsyandi, de Tal à Syangje	94
J15 - Marsyandi, de Syangje à Kudi, puis Kathmandou (bus)	98

Annexes

Une grille P-Tp pour les minéraux de métamorphisme	104
Stabilité des versants et glissements de terrain	106
Légende de la carte géologique du Népal Central	108
Références	110

Compléments dans le texte

Stratigraphie du Moyen-Himalaya	16
Abréviations utilisées pour les principaux minéraux	19
Structure dans la zone du MCT	26
Métamorphisme dans la zone du MCT	28
Plis à axes courbes	34
Des migmatites aux granites du Haut Himalaya	40
L'extrusion du Cristallin du Haut Himalaya	48
Le Quaternaire des environs de Samagaon	56
Autour de Samdo	64
Les granites du Haut Himalaya	66

Documents utilisés

Photographies de A. Pêcher, sauf celles indiquées M. Fort
Figures originales ou extraites des articles cités