

Népal 2011

géologie autour du Manaslu

Arnaud Pêcher et Stéphane Guillot



Aux 4 Coins du Monde
1 rue Aubert Dubayet, 38100 - Grenoble

Népal 2011

géologie autour du Manaslu

du 22 Octobre au 6 Novembre 2011

Arnaud Pêcher et Stéphane Guillot (ISTerre, Grenoble)

Participants

Marie-Claude Amaz
Pierre Bargaud
Christian Beaudette
Muriel Blot
Jean Braun
Fabrice Brécourt
René Cacan
Odile Cacan

Jacqueline Chiardola
Daniel Chiardola
Jean Déclaron
Benôit Fauvet
Marie Louise Gavignet
Olivier Gelin
Stéphane Guillot
Jacqueline Lefèvre

Bernard Marandet
Jonathan Mercier
Christine Navarro
Arnaud Pêcher
Agnès Pêcher
Olivier Vidal
Michelle Viguiier

Livret guide réalisé par Arnaud Pêcher, avec la participation de Jean Déclaron

Organisation du voyage : Agence "Aux 4 Coins du Monde"
1 rue Aubert Dubayet, 38100 - Grenoble

Népal 2011- Géologie autour du Manaslu

Sommaire

Introduction

Carte de l'itinéraire	1
Les grandes lignes de la géologie de l'Himalaya	2
L'Himalaya - Tibet actuel	4
Carte géologique de la zone Marsyandi-Burhi	8
Coupes géologiques de la Marsyandi et de la Burhi	10

Le trek, jour par jour

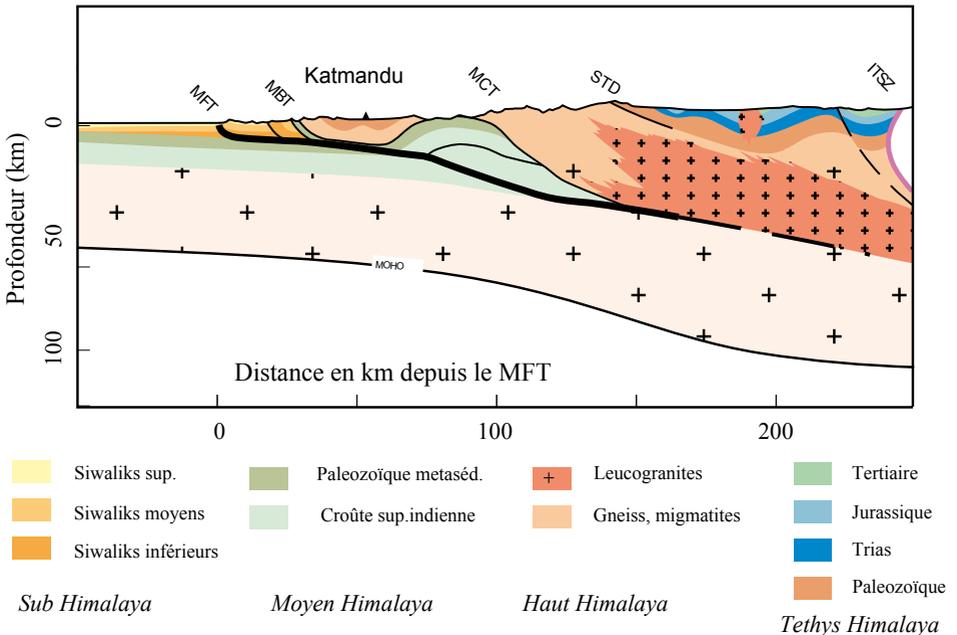
J1, Lu 24 Octobre - Burhi Gandaki, d'Arughat à Lapubesi	12
J2, Ma 25 Octobre - Burhi Gandaki, de Lapubesi à Khorlabesi	20
J3, Me 26 Octobre - Burhi Gandaki, de Khorlabesi à Jagat	32
J4, Je 27 Octobre - Burhi Gandaki, de Jagat à Phewa	38
J5, Ve 28 Octobre - Burhi Gandaki, de Phewa à Ghap	46
J6, Sa 29 Octobre - Burhi Gandaki, de Ghap à Lho	56
J7, Di 30 Octobre - Burhi Gandaki, de Lho à Samdo	62
J8, Lu 31 Octobre - Burhi Gandaki, de Samdo à Dharamsala	67
J9, Lu 1 ^{er} Novembre - Glacier du Larkhya, autour de Dharamsala	76
J10, Ma 2 Novembre - Col du Larkhya, de Dharamsala à Bimtang	82
J11, Me 3 Novembre - Dudh Khola, de Bimtang à Dharapani	86
J12, Je 4 Novembre - Marsyandi, de Dharapani à Syange	94
J13, Ve 5 Novembre - Marsyandi, de Syange à Kudi	100

Annexes

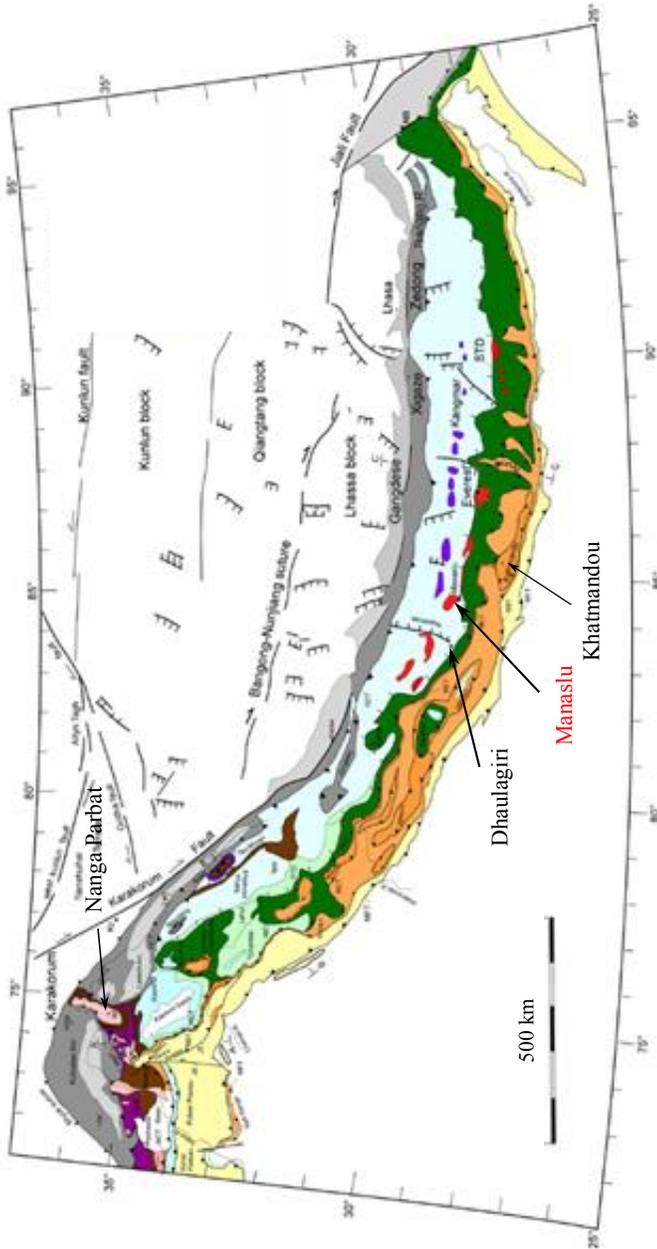
Une grille P-Tp pour les minéraux de métamorphisme	106
Quelques éléments sur l'écologie du Népal	108
Références	110
Notes personnelles	111
Légende de la carte géologique du Népal Central	123



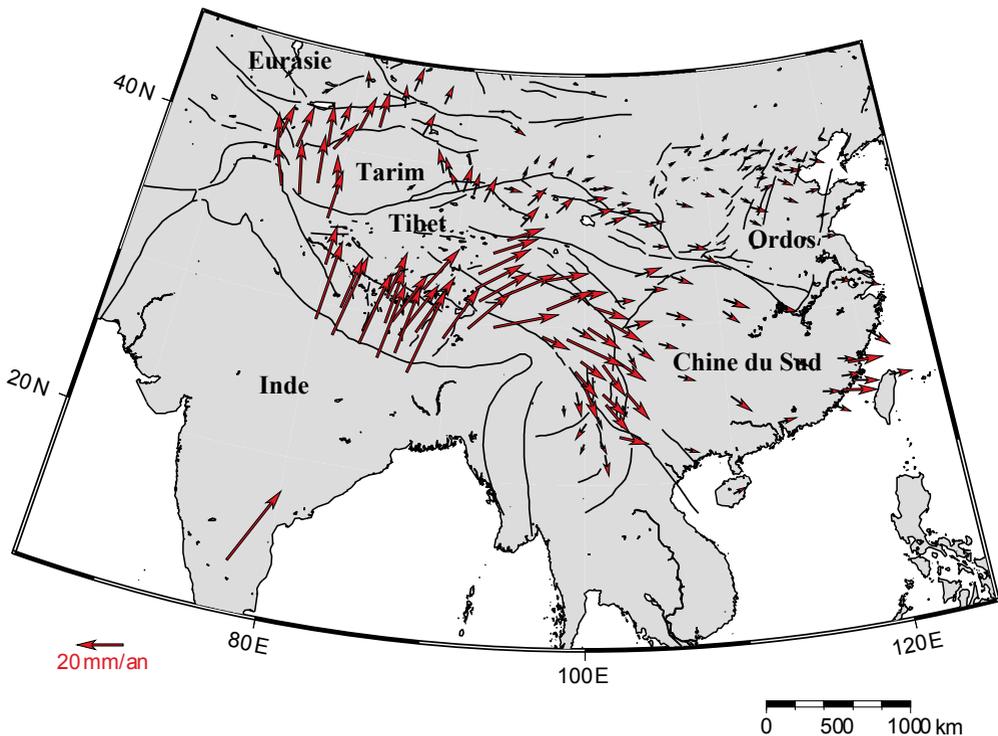
L'Himalaya et le Tibet, vus de la navette spatiale. Vue prise à peu près à l'aplomb de l'Everest, vers l'Ouest. On reconnaît de gauche à droite la plaine du Gange et les bassins intra-Siwaliks (les "duns"), l'Himalaya très enneigé, un peu en arrière la dépression du Tsangpo (la suture), et le Tibet avec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



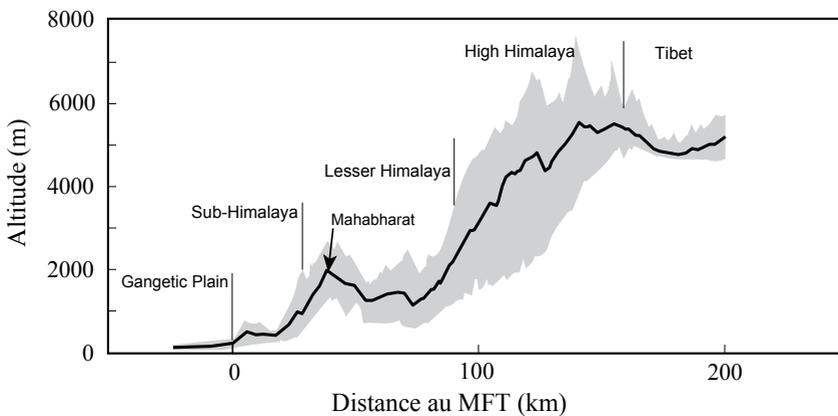
Une coupe de l'Himalaya Central au niveau de Kathmandou. Le trait épais correspond au MHT (Chevauchement Himalayen Principal, Main Himalayan Thrust, se terminant en surface par le chevauchement frontal, MFT) sur lequel se greffent les autres chevauchements majeurs (in Avouac, 2007)



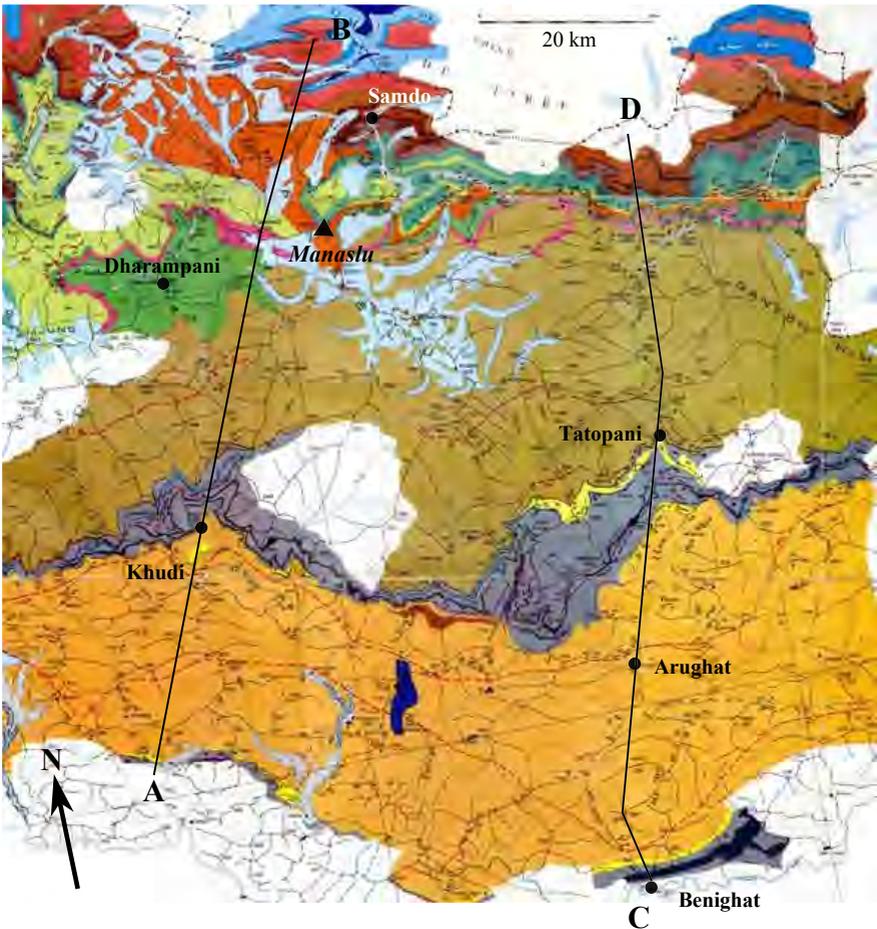
Une carte générale de l'arc Himalayen, entre virgation du Nanga Parbat, à l'Ouest et virgation du Namche Barwa, à l'Est. Du Sud au Nord se succèdent : le chaînon miocène des Siwaliks (jaune pâle); les nappes du Moyen Himalaya (brun pâle); le Cristallin du haut Himalaya (vert); les séries sédimentaires de couverture (Cambrien-Crétacé sup) (en bleu), recoupées 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.80



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).

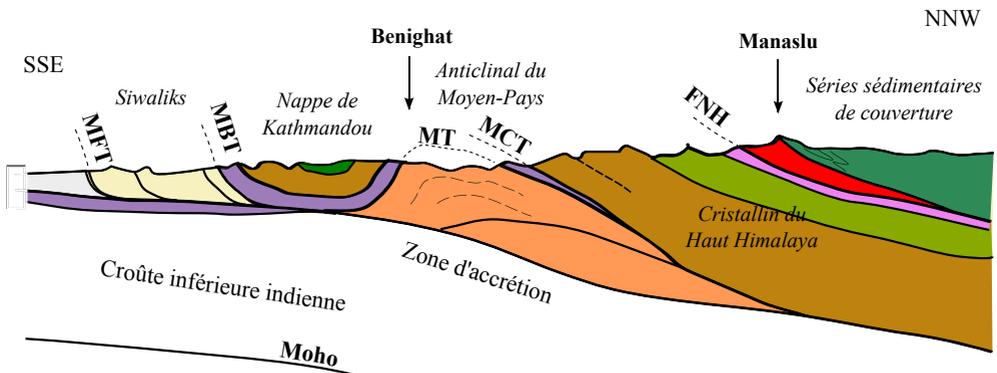


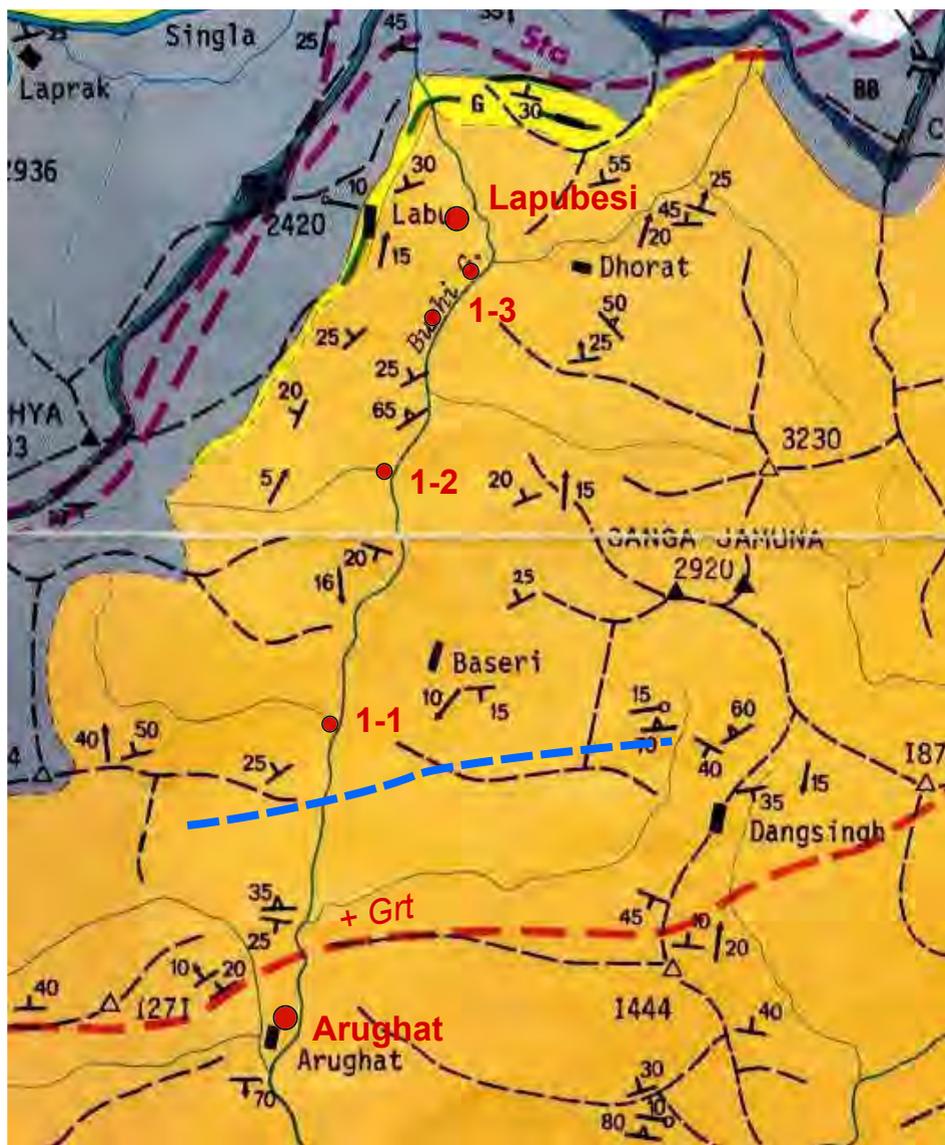
Altitudes minimum, maximum et moyenne dans une bande de 50 km de large centrée sur la coupe du Langtang, un peu à l'Est du Manaslu (Avouac, 2007)



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)

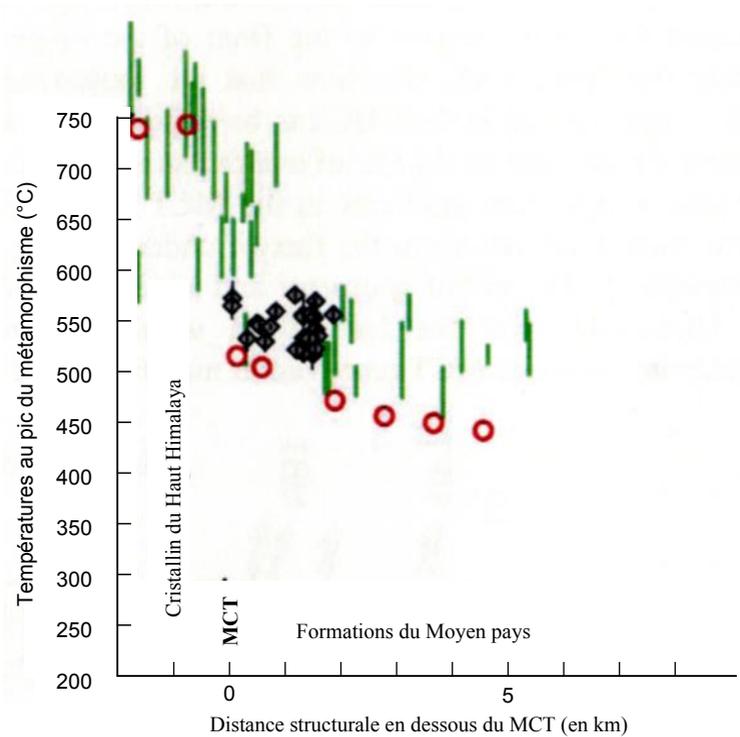




Extrait de la carte géologique du Népal Central (Colchen et al., 1978) - Légende : voir annexe (page dépliante) à la fin du livret-guide. Dans les teintes jaunes : la formation de Kunchha ; en violet et bleu, les formations du Moyen Pays supérieur. En tireté bleu, l'axe de l'anticlinal du Moyen-Pays.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

Dans les formations peu métamorphiques, il est souvent difficile de quantifier les valeurs de T_p et de P atteintes au pic du métamorphisme. Parmi les méthodes récemment développées, l'une se base sur le degré de cristallinité de la matière graphiteuse, déterminé au spectromètre Raman (Beysac et al., 2002).

Cette méthode (RSCM) a été appliquée en Himalaya, sur une transversale située à notre niveau (Beysac et al., 2004, Bollinger, 2006). Les échantillons proviennent des schistes et calcaires carbonés qui affleurent de part et d'autre de l'anticlinal de Kunchha (formations du Moyen Pays supérieur) : au Nord, loin du front de la chaîne (environ 80 km), mais près de la trace actuelle du MCT ; au Sud, plus près du front de la chaîne (environ 50 km), un peu en dessous de la klippe cristalline de Kathmandou.



Dans la zone qui nous concerne aujourd'hui (ci-dessus, dans la partie Nord des formations du Moyen Himalaya et dans la base du CHH), on dispose de suffisamment de minéraux de métamorphisme pour donner les températures atteintes au pic du métamorphisme. Ces températures croissent du bas de la pile métamorphique vers le haut (métamorphisme inverse), pour atteindre des environ 450 à 500°C dans la zone parcourue aujourd'hui (ce qui est cohérent avec l'apparition du grenat), puis jusqu'à près de 750°C dans le CHH. Les mesures RSCM sont en bon accord avec les données des méthodes conventionnelles de thermométrie.

J2 - Mardi 25 Octobre (2)

2-1a Peu en aval du débouché de la Machha Khola, coupe de la première barre calcaire des Formations du Moyen Pays Supérieur (début coupe : 28°13'18" / 84°52'35")

En blocs, venant de la crête RD de la Machha, brèches à matrice gréso-calcaires et gros blocs calcaires (restes de stromatolithes ?) Malgré l'aspect peu déformé, staurotide dans la matrice.

Dans l'éperon qui suit, ces brèches sont en place, intercalées dans des calcaires parfois massifs



Ph 2-1a



Ph 2-1b

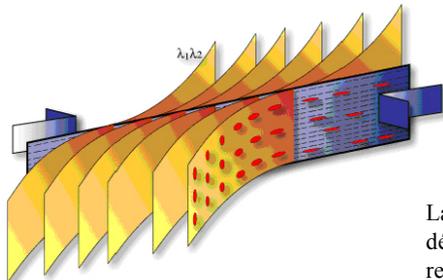
2-1b Alternances de niveaux gréso-calcaires et de calcaires "pustuleux" (restes de fossiles ?). Figures de déformation cisailante "haut vers le Sud", associées au MCT : plis d'entraînement, parfois recoupés par la schistosité.

2-2 En arrivant au débouché de la Namrung Khola (28°15'04" / 84°52'56"), écroulement des barres qui forment la crête de Khorlak : micaschistes à musc-grt et amph-grt (également dans cette zone Sta et Ky, surtout visibles en LM). Le pendage de la série est de 30 à 40° N, c'est à dire que l'on remonte structurellement dans la série. On voit donc que le métamorphisme croît vers le haut (métamorphisme inverse).

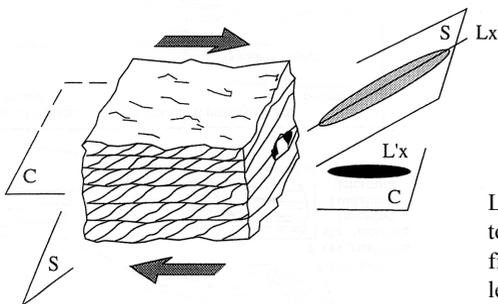
Pas de hiatus métamorphique net entre MP Inf (vu hier) et MP Sup : pose le problème de la définition du (ou des) MCT (on est censé avoir passé le Munsiri Thrust)



2-2

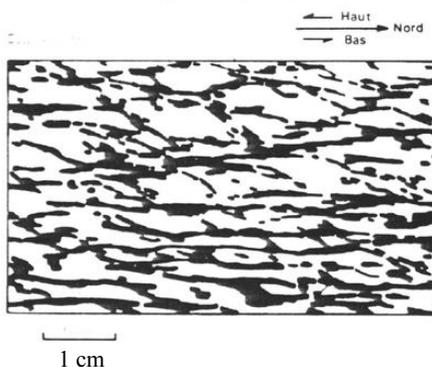
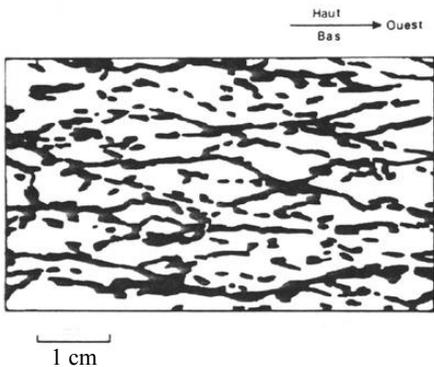


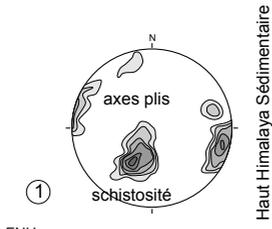
La géométrie d'une zone de cisaillement, ici un décrochement vertical dextre. Eléments remarquables : le plan d'aplatissement, de mieux en mieux marqué vers le coeur de la zone ; la linéation d'étirement, confondue au coeur de la zone avec la direction de transport (dessin P. Rey)



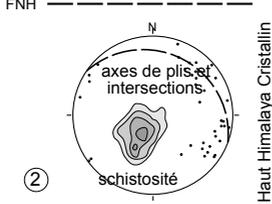
Le cisaillement est le plus souvent hétérogène, à toutes échelles. A échelle du cm, on obtient ces figures C-S, avec des amygdales découpées par les plans de cisaillement réguliers (C), et les surfaces sigmoïdes d'aplatissement (S).

En lame-mince (ci-dessous, échantillon provenant de la Modi khola, au N de Pokhra), on peut aussi voir des figures C-S : amandes en forme de parallélogramme en section XZ parallèle à la linéation d'étirement LX, en forme de losange en section YZ perpendiculaire à LX.

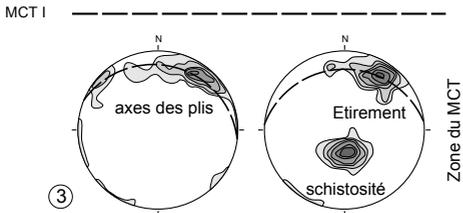




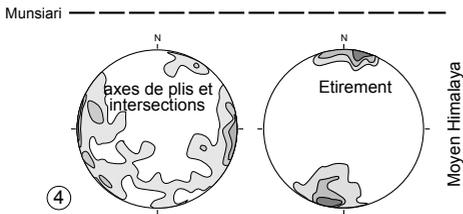
Haut Himalaya Sédiméntaire



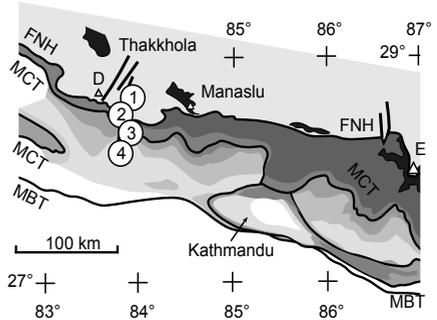
Haut Himalaya Cristallin



Zone du MCT



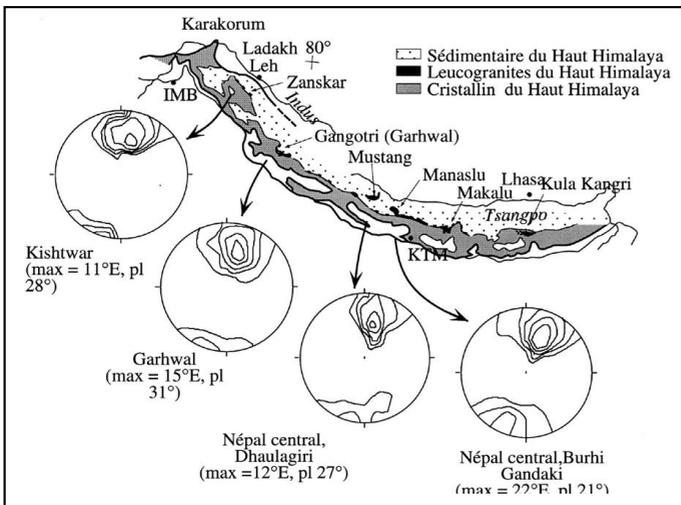
Moyen Himalaya



Du Nord au Sud de la Haute Chaîne, la schistosité est très régulièrement pentée N à NNE. La linéation d'étirement LX est très visible dans la zone du MCT, et orientée N20°E. Les axes de plis sont parallèles à la chaîne au N et au S, mais se parallélisent à LX dans la zone du MCT (cf. stéréos ci contre, coupe des Annapurnas, in Mascle et al., 2010)

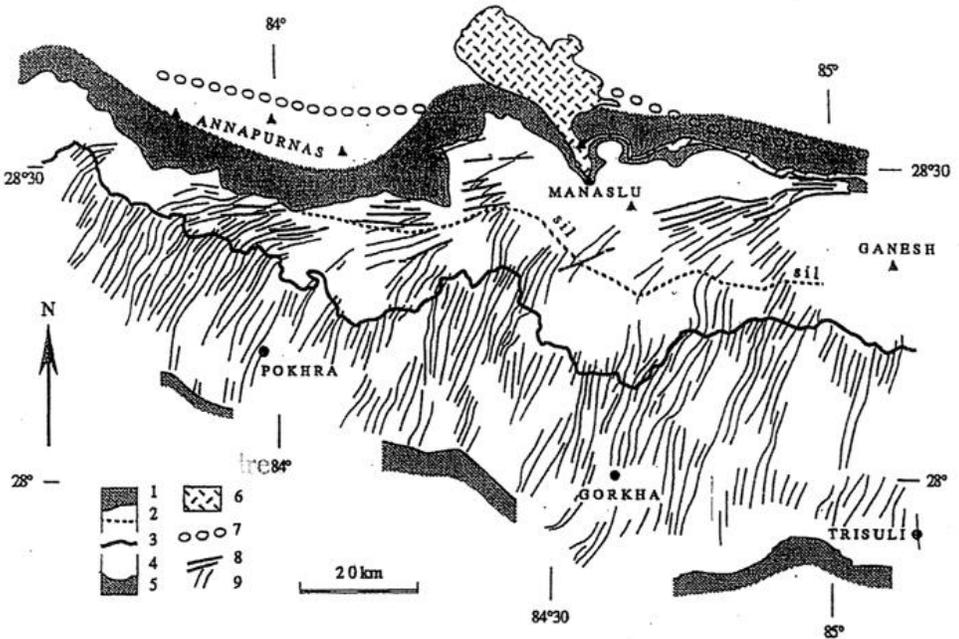


Photo : la linéation d'étirement LX, ici marquée par l'étirement des feldpaths dans un orthogneiss (gneiss d'Ulleri, au sommet de Kunchha, même affleurement que celui de la photo p. 25)



LX marque la zone du MCT quel que soit la coupe étudiée. Sa direction reste remarquablement constante, comme on peut le voir sur les stéréo-grammes ci-contre (AP)

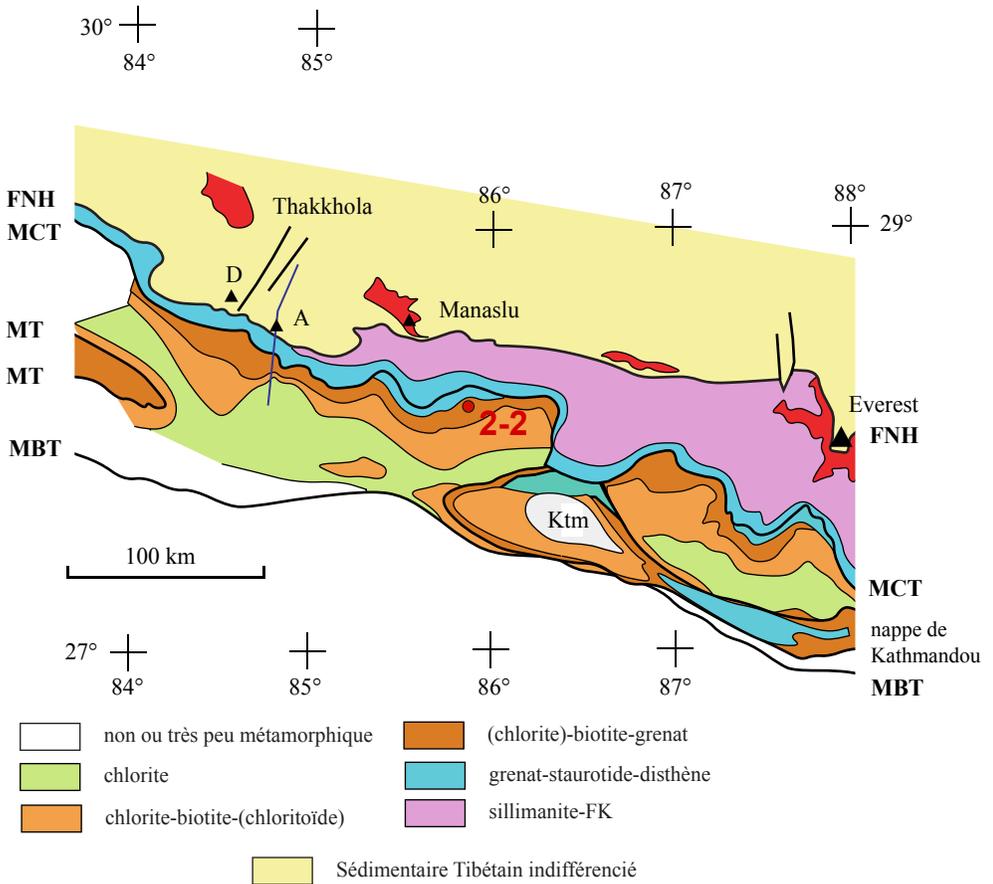
Entre le Haut Himalaya très métamorphique et les nappes moins métamorphiques du Moyen Himalaya, il n'y a pas un chevauchement unique bien défini, mais toute une zone de cisaillement intense et hétérogène. Le MCT (MCT 2) est la limite lithologique Haut-Moyen Himalaya ; c'est aussi là que le cisaillement 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 CHH (cf coupes p. 11). La nappe de Kathmandou, bien que dans une position structurale analogue, est plus ambiguë.



Carte de la linéation d'étirement au Népal Central (in Bouchez-Pêcher, 1981)

Dans cette zone de cisaillement, trois marqueurs principaux : la **schistosité** (plan d'aplatissement), souvent associée au **plan de cisaillement** dans des amandes 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.

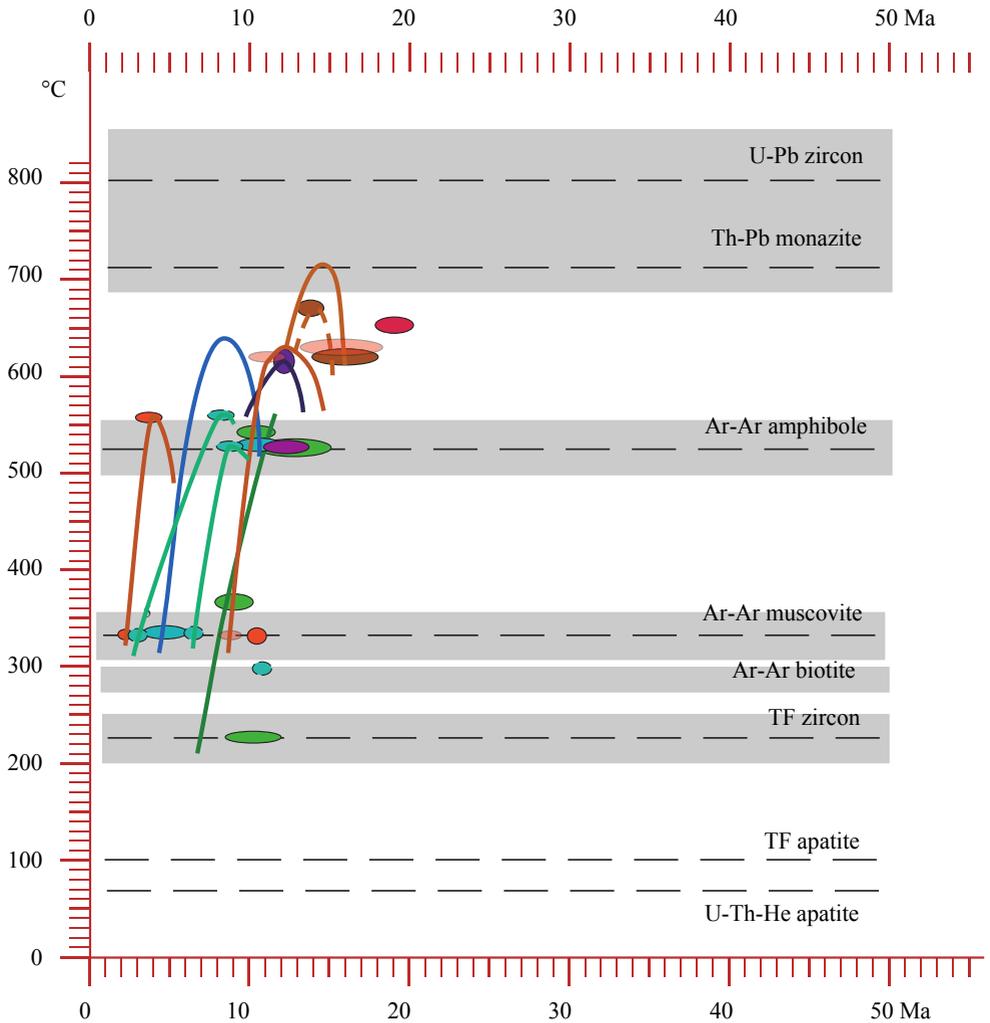
Le sens de cisaillement (en général haut vers le Sud) est donné par la "dissymétrie" des fabriques tectoniques, figures toujours "monocliniques" (1 seul axe de symétrie, d'ordre 2).



En remontant la Burhi Gandaki, nous sommes partis dans les formations de Kunchha peu métamorphiques (schiste vert), puis rapidement le grenat est apparu. Peu au Nord de Labu, le staurotide puis le disthène apparaissent. Enfin nous verrons que la sillimanite est très abondante dans les migmatites du Haut Himalaya. Dans toute cette partie de la coupe, nous remontons structurellement dans la série (fig. ci-contre) : il y a donc augmentation du métamorphisme du bas vers le haut. C'est le fameux **métamorphisme inverse** himalayen. Nous discuterons des processus - encore débatus - qui peuvent aboutir à cette géométrie (effet d'une structure thermique transitoire, superposition d'unités de métamorphisme différent, ...). Un élément important à garder en tête : la corrélation cartographique nette (cf. carte ci-dessus) entre la zone du MCT et le métamorphisme inverse.



Arrêt 2-2 Schiste à grenats



Note :

âges muscovites : âges de refroidissement

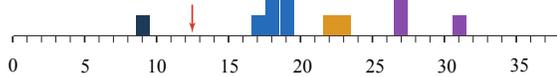
âges apatites progrades :

- en équilibre avec paragenèse métam = âge T_p max

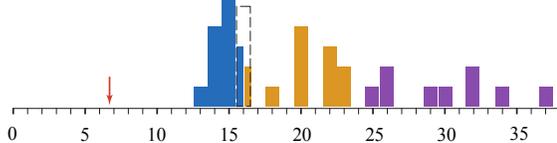
- dans coeur grenat, < T_p max atteinte, âge trajet prograde

Compilation des âges obtenus par différentes méthodes dans différentes coupes du MP Sup, du Népal central au Bouthan (in Mascle et al., 2010). En dessous du MCT, le métamorphisme inverse prograde débute avec l'activation du MCT. Il est contemporain de la fin du métamorphisme néo-himalayen M2 dans le CHH, au dessus du MCT (voir fig. ci-contre). Les âges les plus précoces, vers 18 Ma, sont obtenus dans des monazites progrades d'échantillons situés très près du MCT. Plus loin du MCT, le trajet âge- T_p est décalé vers des âges plus jeunes. La fin du refroidissement est rapide, avec des âges Ar-Ar sur muscovite entre 10 et 3 Ma.

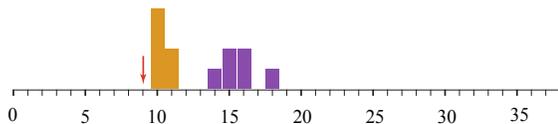
Haut du HHC



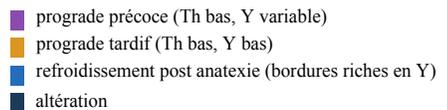
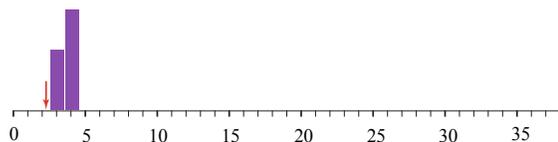
Bas du HHC



Zone du MCT, partie haute



Zone du MCT, partie basse



Âges des monazites du Langtang, un peu à l'Est du Manaslu (in Khon et al., 2004) - Les monazites (phosphates de terres rares) ont été différenciées en monazites progrades et rétrogrades sur des critères microstructuraux en LM et sur des critères de composition chimique (teneurs en Y et Th). Chaque monazite (ou partie de monazite) a ensuite été datée par la méthode U-Pb. Ce diagramme est tout à fait remarquable, car il montre que

- 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.

On note la convergence des âges au toit (monazites rétrogrades) et au mur (monazites progrades) du MCT, qui indique que à cet endroit et pour la portion de coupe aujourd'hui à l'affleurement, le début du fonctionnement à chaud du MCT s'est produit vers 15 Ma.

j3 - Mercredi 26 Octobre

Jagat

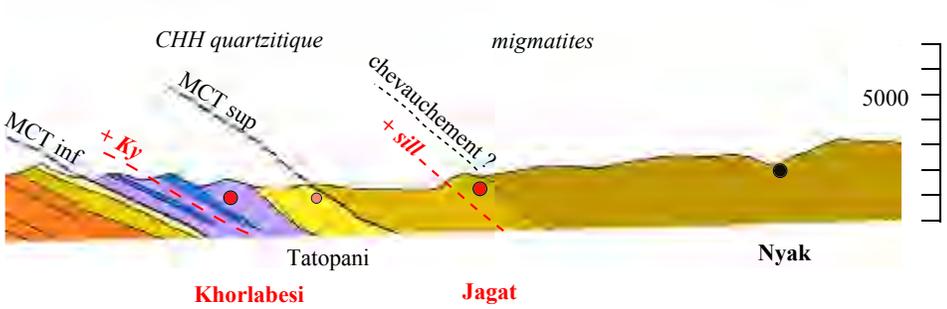
env 1360m (28°21'7"N / 84°53'44"E)

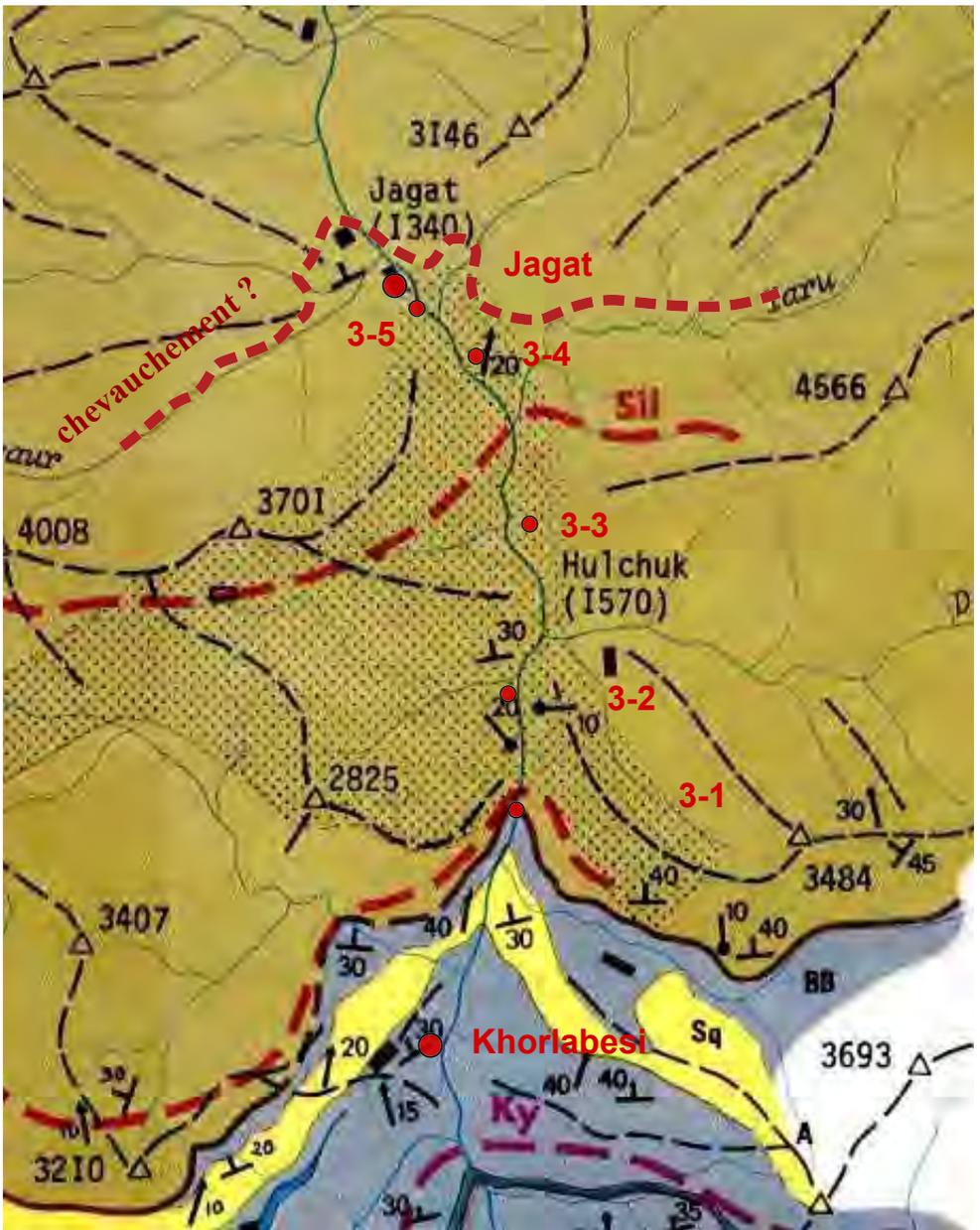


Khorlabesi

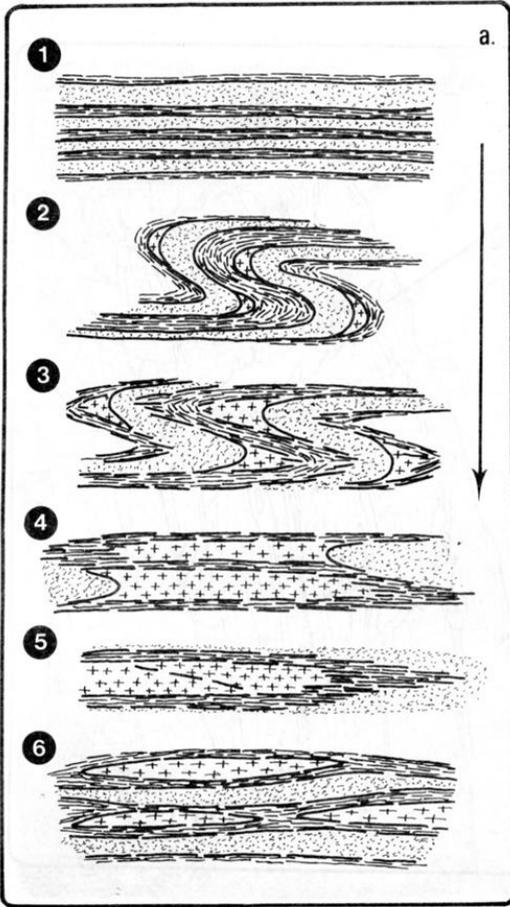
env 900m (28°15'17"N / 84°53'01"E)

Thème : MCT - Base du Cristallin du Haut Himalaya





5 km



Fusion et litage migmatitique

D'après les travaux de M. Brouand (1989) en Marsyandi, la fusion se fait largement in situ, et les mobilisats migrent dans un premier temps dans les charnières de plis. L'accentuation de ces plis aboutit à une transposition totale du litage métamorphique antérieur (cf dessin et Ph 3-3a, p. 35 et 3-3b et c, ci-contre).



Ph 3-3b Apparition d'un litage "migmatitique" dans les métagrauwackes du CHH.

Dans cette zone, le gneiss migmatitique est repris tardivement par des plis à surface axiale en général très pentée N.

Au Nord de Dobhan, les gneiss du CHH ne sont plus quartzitiques, mais dérivent d'une roche à composition grauwackeuse. Le métamorphisme, de HT (on arrive à la zone d'apparition de la sillimanite, très abondante plus au Nord) a abouti à la formation de migmatites.

Ph 3-3c (SG) : plis 1 soulignés par les mobilisats granitiques, repris par les plis 2, ici à S axiale verticale





Jagat

5 km

j4 - Jeudi 27 Octobre (2)

4-1(28°21'30" / 84°53'20") et **4-2** (28°21'31" / 84°53'26"), en aval de Salleri, sur les 2 rives de la Burhi : toujours les gneiss en plaquettes, mais à lits à minéraux calciques (Hb-Dio-Scap), ce qui évoque la Formation II. De beaux plis synschisteux, dont la charnière est parallèle à la linéation d'étirement LX. Ceci implique un 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 et non mentionné depuis.



Ph 4-1a : pli en fourreau dans les quartzites, section perpendiculaire à l'axe



Ph 4-1b : 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).

4-2 (28°21'31" / 84°53'26"), en RG Burhi, en face de Salleri. Migmatites à sillimanite. Plis tardi-métamorphiques déversés N (mvt de type FN)

Ph 4-2



4-3a (28°24'00" / 84°53'41") à **4-3b** (28°25'39" / 84°53'54") en amont de Philim. Migmatites à sillimanite. Analyse du collectage des leucosomes (cf p. 45)

Ph 4-3c



4-3c Au pont de Nyak (28°26'07" / 84°53'53") . Dans les migmatites, la sillimanite souligne des plans de cisaillement dextres (une des composantes de la Zone de Cisaillement Nord Himalayenne (ou Sud Tibétaine). Ph 4-3c

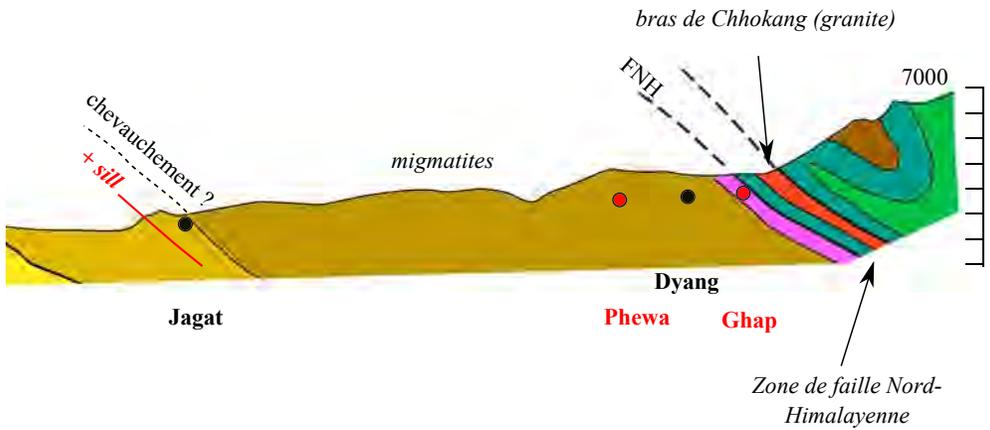
j5 - Vendredi 28 Octobre

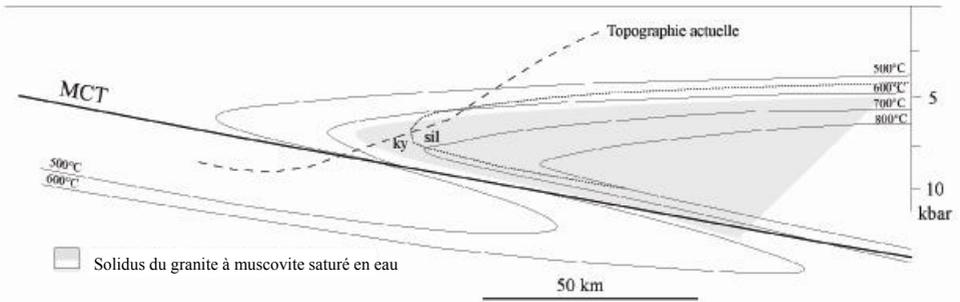
Ghap
env 2150 m (28°31'52"N // 84°49'35"E)

env 10 km →

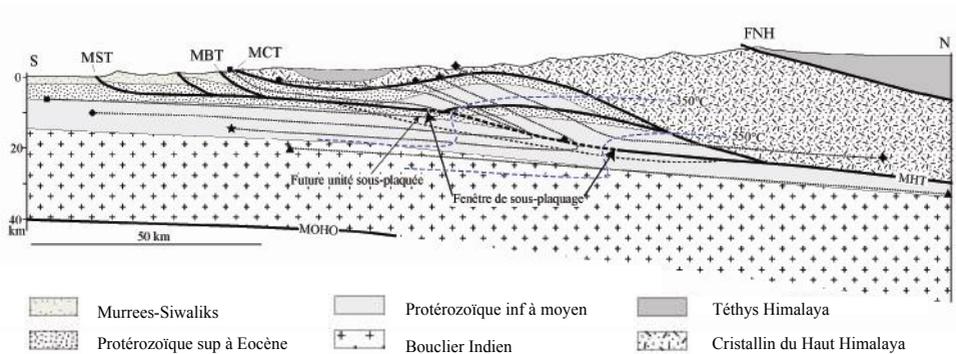
Phewa
env 1700m (28°27'17"N / 84°53'35"E)

Thème : Cristallin du Haut Himalaya. Gneiss oillés de la formation III. Zone de Faille Nord Himalayenne





Le modèle en "fer à repasser" (Le Fort, 1975)

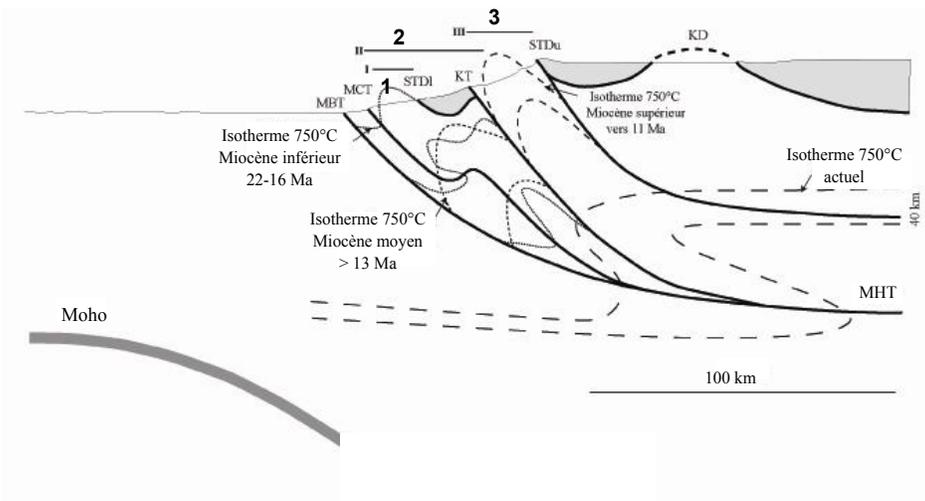


Le modèle de sous-placage tectonique (Bollinger et al., 2006). "Sous-placage" signifie ici que le raccourcissement est absorbé par déformation essentiellement en dessous du MCT

Le métamorphisme inverse - Plusieurs familles de modèles, 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-dessus, haut),
- les modèles qui considèrent la zone du MCT comme un empilement d'écaillés tectoniques. Un modèle qui donne des résultats très conformes à la réalité du terrain : le modèle de sous-placage d'écaillés (Bollinger et al., 2006, dessin ci-dessus, bas),
- les modèles de prisme orogénique (extrusion d'un coin entre un MCT "plat" et une FNH "raide" (dessin p. 51)
- les modèles d'extrusion ductile entre MCT et FNH, basés sur le modèle de Beaumont et al., 2004 de channel flow (voir p. 55).

L'extrusion du Cristallin du Haut Himalaya par "channel flow", entre MCT et FNH. Dans ces modèles, le MCT n'est pas un chevauchement au sens tectonique classique du terme, ni la FNH une faille normale. Ce sont les limites passives de la zone d'extrusion, avec des mouvements relatifs apparents de type chevauchement (en dessous, le MCT) et faille normale (au dessus, la FNH).



Une autre application du modèle de channel flow, au Bouthan (Grujic, 2006, in Mascle et al., 2010). Dans cette interprétation, l'exhumation par fluage se fait dans plusieurs chenaux, n'ayant pas tous fonctionné en même temps. La FNH (STD) est dédoublée (comme c'est souvent le cas), avec une FNH inf. fonctionnelle lors du premier épisode, et une FNH sup. fonctionnelle lors du troisième. 1, 2 et 3 : limites actuelles des zones chenalisées successives. KD : dôme de Kangmar, ou le CHH réapparaît en fenêtre sous la couverture sédimentaire détachée.

j6 - Samedi 29 Octobre (2)

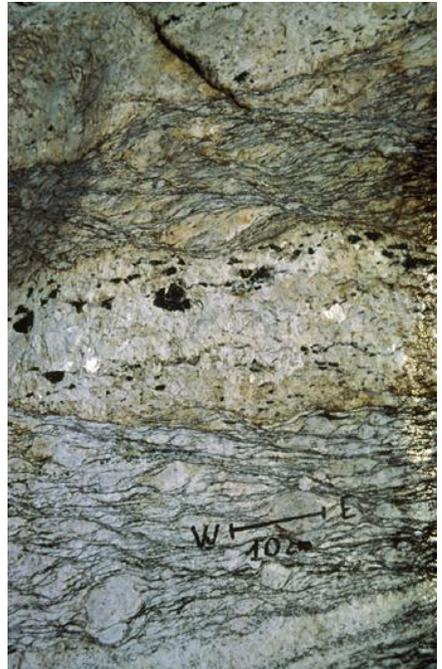
6-1 (28°32'45" / 84°46'01") Cascade de Bardham. Lames de granite du Manaslu dans les marbres à pyroxène

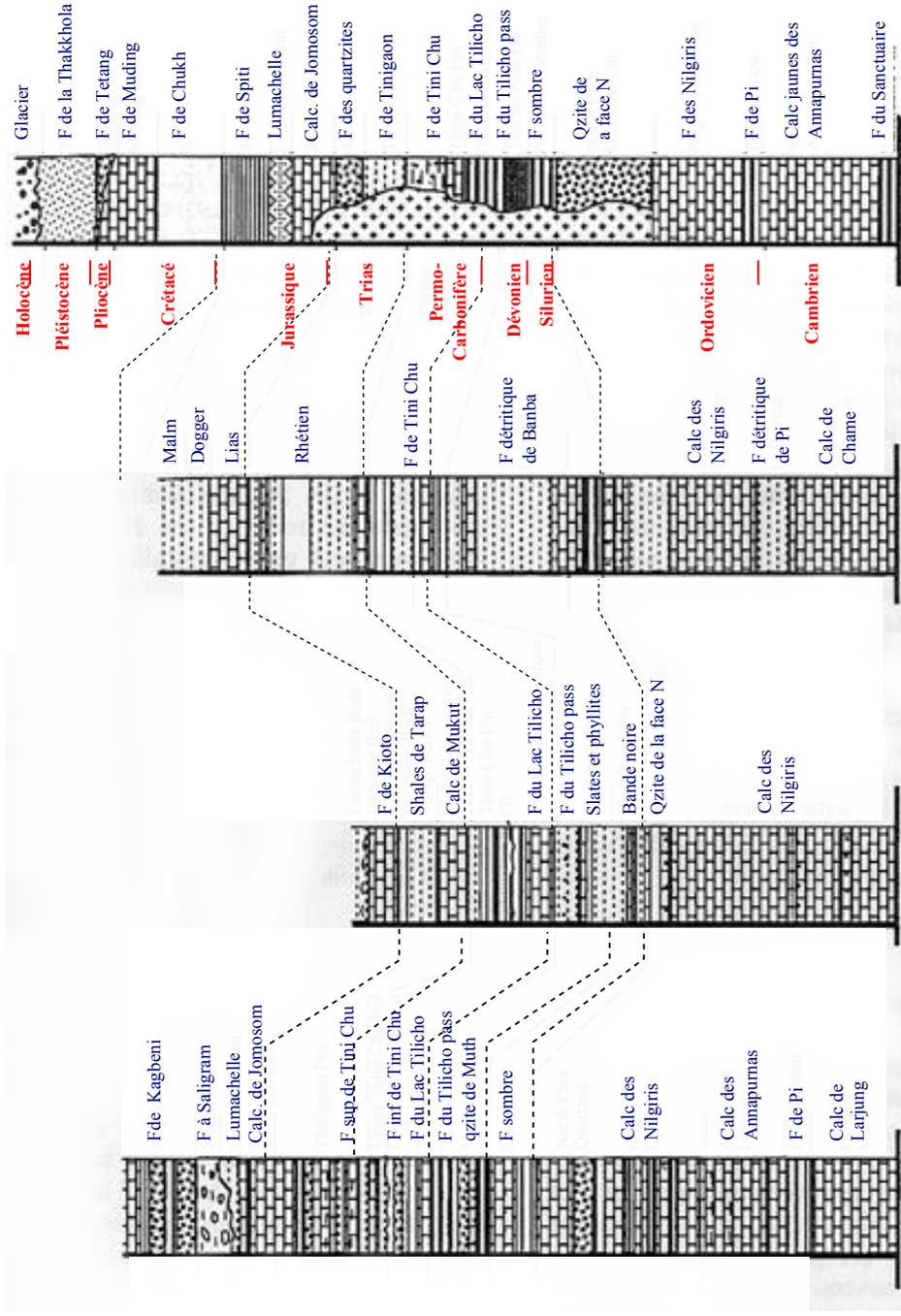
6-2 (28°33'50" / 84°43'59") Torrent de Hinang (Lanjam), avant Sho. Calcaires des Nilgiris à pyroxène

6-3 (28°34'12" / 84°43'09") Calcaires des Nilgiris à pyroxène

Granite et pegmatite à tourmaline du bras de Chhokang, intrusifs dans les gneiss ocellés du haut du CHH. Noter les belles amandes C-S. Le filon de pegmatite semble à première vue tardif par rapport au cisaillement. Mais on voit que ses épontes sont décalées de manière ductile par les plans C.

Photo prise à Chhokang (à l'Est de notre coupe), mais nous pourrions faire des observations similaires en Haute Burhi Gandaki, aux alentours de Ghap.



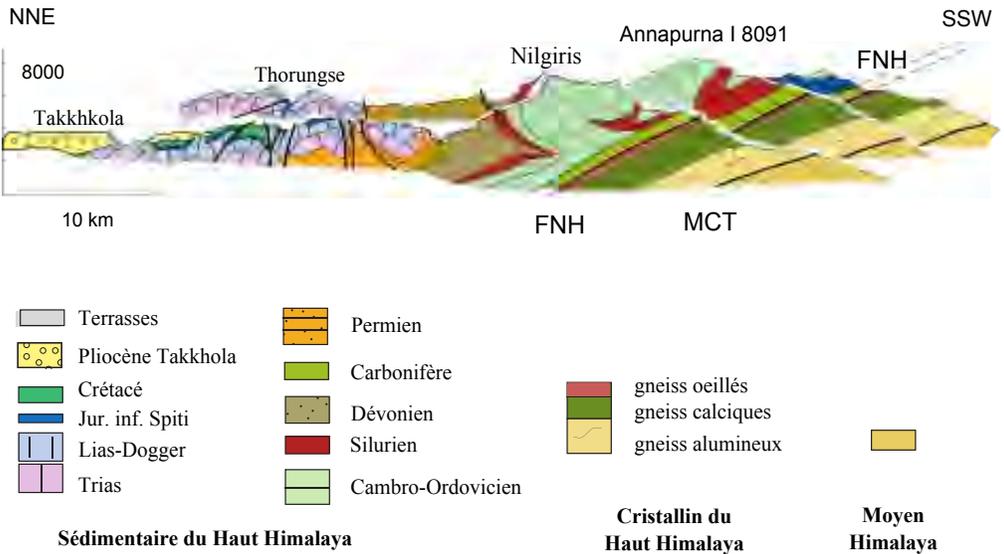


Thakkhola

Manang

Nyi Shang
(Haute Marsyandi)

Annapurna- Manaslu -
Ganesh Himal



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 à la nappe eo-himalayenne de Shikar Beh, que certains d'entre nous ont vu sur la route du Ladakh (synclinal déversé Nord de Tandi).

j7 - Dimanche 30 Octobre

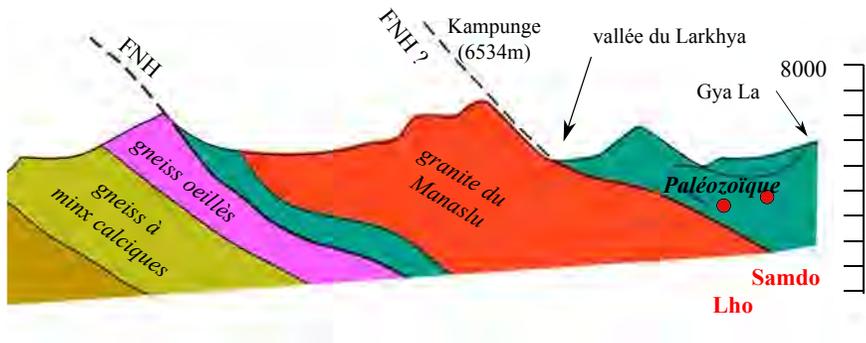
Lho env 3200m (28°34'27"N // 84°42'01"E)

env 13 km →

Samdo env 3860m (28°39'04"N // 84°38'05"E)

Thème : Base des Séries Sédimentaires , géologie de paysage sur le granite

Plusieurs montées depuis le chemin principal : dans le vallon du Gyalen (env. 120 m) ; dans le vallon de Kolahu en RG de la Burhi, env. 600m de dénivellée, mais très belles vues sur le Manaslu pendant toute la montée ; en RD de la Burhi peu avant le pont de Samdo (env. 100 m).
Montées facultatives, le cas échéant privilégiez le début de la montée vers le col de Kolahu (7-2 et au dessus).

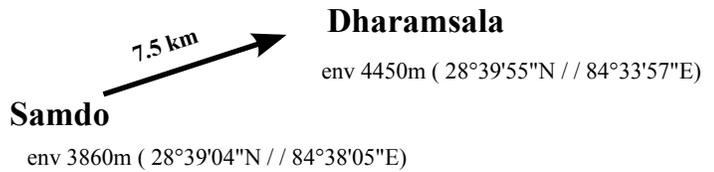




5 km

Tiré épais rouge : limite orientale du granite du Manaslu

j8 - Lundi 31 Octobre



Thème : Contact bas du granite du Manaslu. Journée d'acclimatation, consacrée aux affleurements en RD du Glacier du Larkhya

j8 - Lundi 31 Octobre (2)

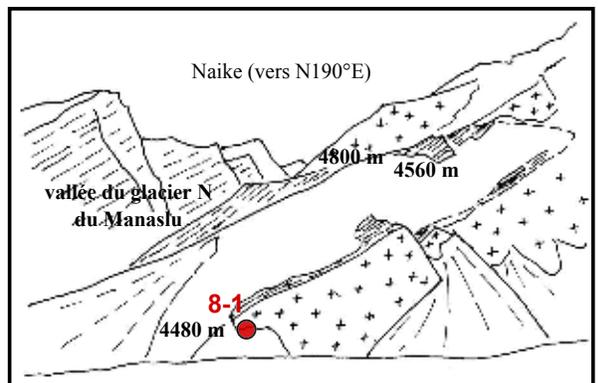


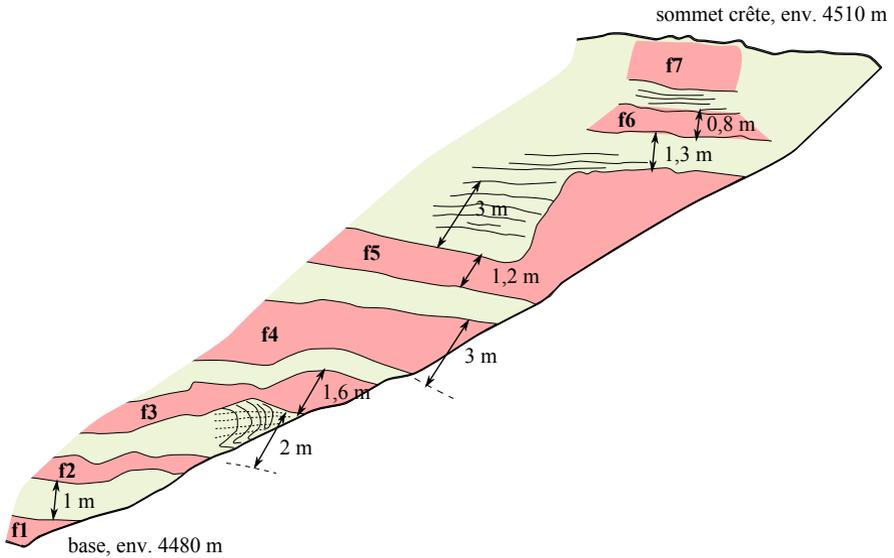
De la vallée de Lajung à l'Est de Samdo, le vallon et le col du Larkya. Vue vers N290°. Samdo est RG de la petite plaine au pied du vallon, le Gya La (frontière du Tibet) au sommet du premier vallon dont on devine le départ à droite.



8-1(28°39'11" / 84°35'09")

Contact du granite en RD du glacier du Larkhya. Nous suivrons la proximité immédiate du contact en remontant la croupe facile au dessus du point 8-1, sur environ 40 m de dénivellée. Les altitudes indiquées sont très imprécises, mesurées à l'altimètre en 1991.





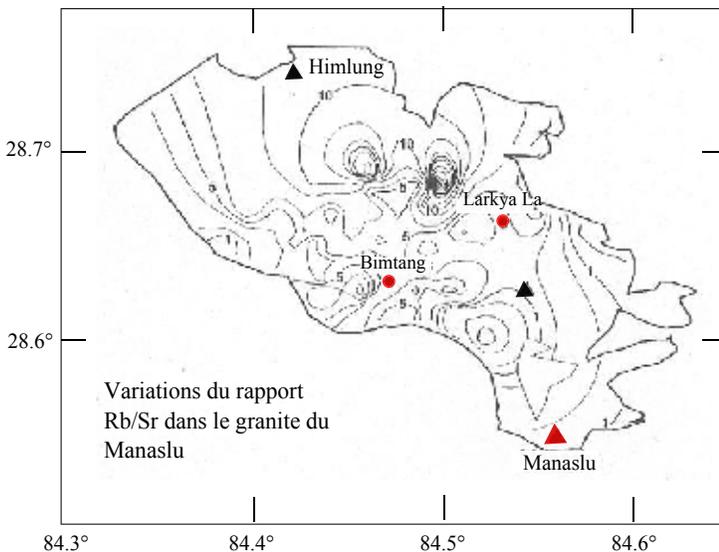
Le granite du Manaslu intrude les séries sédimentaires à différents niveaux, de la base du Paléozoïque jusqu'au Trias. On peut observer ce contact à différents niveaux : aujourd'hui, dans le flanc du pluton, dans le Paléozoïque (Siluro-Dévonien), demain au toit du pluton, dans le Trias.

Le schéma ci-dessus est fait d'après un croquis de terrain du contact du granite dans le Paléozoïque, RD du glacier du Larkhya (pt 8-1). La coupe suit sur une quarantaine de m de dénivellée le sommet de la crête RD du grand cône d'éboulis (fig. p. 71). 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 aplitite 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...

Ci-contre (p.73), 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).

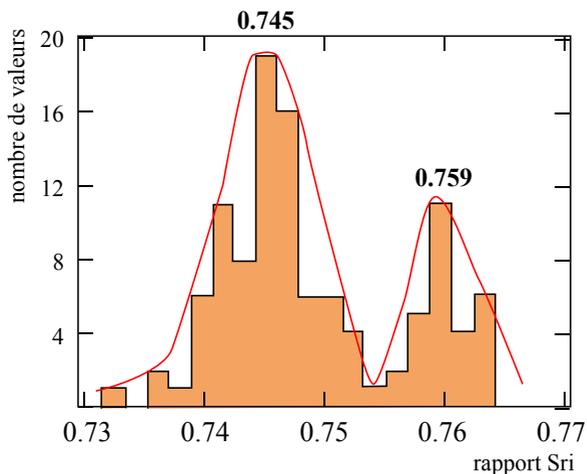
j8 - Lundi 31 Octobre (3)

Le granite du Manaslu est typiquement un leuco-granite produit par fusion crustale. C'est un granite hétérogène, qui comporte deux pôles principaux : un granite à deux micas, riche en muscovite, et un granite à tourmaline, moins abondant. 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 plus basse température.



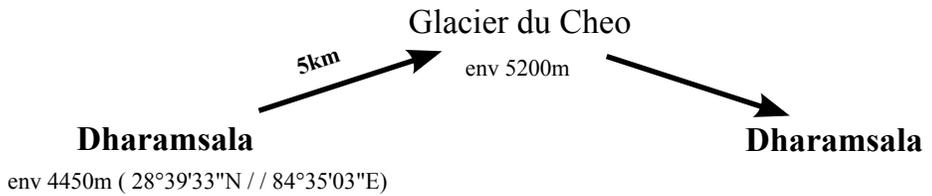
granite	à tour.		à tour-musc		à 2 micas	
Majeurs		dev.std.		dev.std.		dev.std.
SiO ₂	73.6	0.73	73.98	0.72	73.55	1.25
Al ₂ O ₃	14.84	0.29	14.71	0.4	14.85	0.01
Fe ₂ O _{3t}	0.77	0.21	0.87	0.23	0.91	0.34
MgO	0.088	0.07	0.11	0.08	0.13	0.13
CaO	0.41	0.17	0.45	0.16	0.56	0.33
Na ₂ O	4.23	0.34	4.06	0.34	4.04	0.28
K ₂ O	4.54	0.49	4.46	0.46	4.5	0.44
TiO ₂	0.06	0.04	0.078	0.05	0.1	0.07
P ₂ O ₅	0.14	0.07	0.13	0.06	0.12	0.07
H ₂ O	0.8	0.2	0	0.2	0.9	0.3
Total	99.5					
Traces (ppm)						
Ba	133	43	193	111	263	188
Rb	391	70	348	88	312	123
Sr	41	12	66	33	96	78
Th	4	20	4	2	5	2
U	10	4	11	7	6	5
REE (ppm)						
La	8.76	3.95	8.14	0.9	13.37	6.79
Ce	11	3.27	17.35	1.89	21.3	6.86
Nd	4.3	1.81	7.27	0.8	9.16	3.3
Sm	1.46	0.6	2.35	0.23	2.88	1.19
Eu	0.27	0.13	0.44	0.01	0.48	0.12
Gd	1.56	0.61	2.46	0.12	2.77	1.2
Dy	1.8	0.63	2.11	0.17	2.46	1.2
Er	0.79	0.3	0.85	0.09	0.92	0.39
Yb	1.01	0.96	0.7	0.16	0.82	0.34
Lu	0.11	0.03	0.12	0.01	0.13	0.05
Y	9.69	1.35	9.78	0.6	13.33	7.66

Ci-dessus, tableau de la moyenne des analyses chimiques pour les 3 faciès du granite du Manaslu (au total, env. 100 analyses, in Mascle et al.2010).

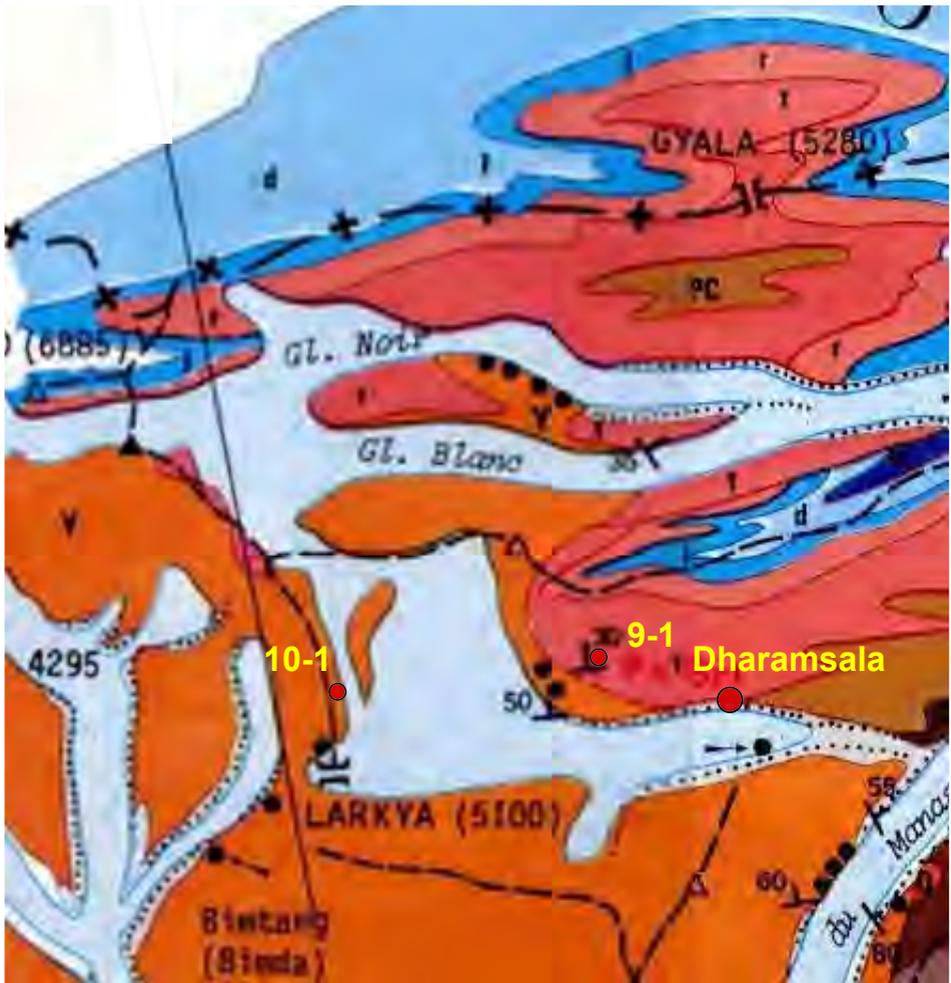


Histogramme des rapports Sr_i dans le granite du Manaslu (Guillot et Le Fort, 1995). Les zones à Sr_i faible correspondent aux zones où le granite à 2 micas est prépondérant.

Mardi 1er Novembre



*Thème : Contact supérieur du granite du Manaslu. Métamorphisme de contact dans le Trias.
Point haut de notre périple, en A-R depuis le camp de Dharamsala (possibilité de rester au camp et de voir en blocs dans la moraine les différents faciès)*



5 km

Le contact du granite du Manaslu a pu être observé et échantillonné en plusieurs points de sa limite Est, points qui correspondent à plusieurs niveaux structuraux, de son plancher (figure p. 81 : C1, dans le vallon de Pong Gien) jusqu'à son toit (C6, notre arrêt 9-1, et C7, plus au Nord, Guillot et al., 1995).

- à la base du granite, la température a atteint 550°C (voir diagramme P-Tp page 81) et est restée haute après la mise en place du granite,
- au sommet, le refroidissement a été beaucoup plus rapide, avec sans doute fort dégagement de CO₂ par transformation des calcaires,
- la différence de pression entre le bas et le haut du pluton (env. 150 MPa) est cohérente avec son épaisseur observée,
- mais la pression est forte (encore >500 MPa au toit du granite), ce qui pourrait s'expliquer par le replissement de grande ampleur de la couverture sédimentaire dans le pli des Annapurnas.

j9 - Mardi 1er Novembre (2)

9-1(28°40'26" / 84°32'32") Contact du granite sur la croupe RG du glacier du Cheo

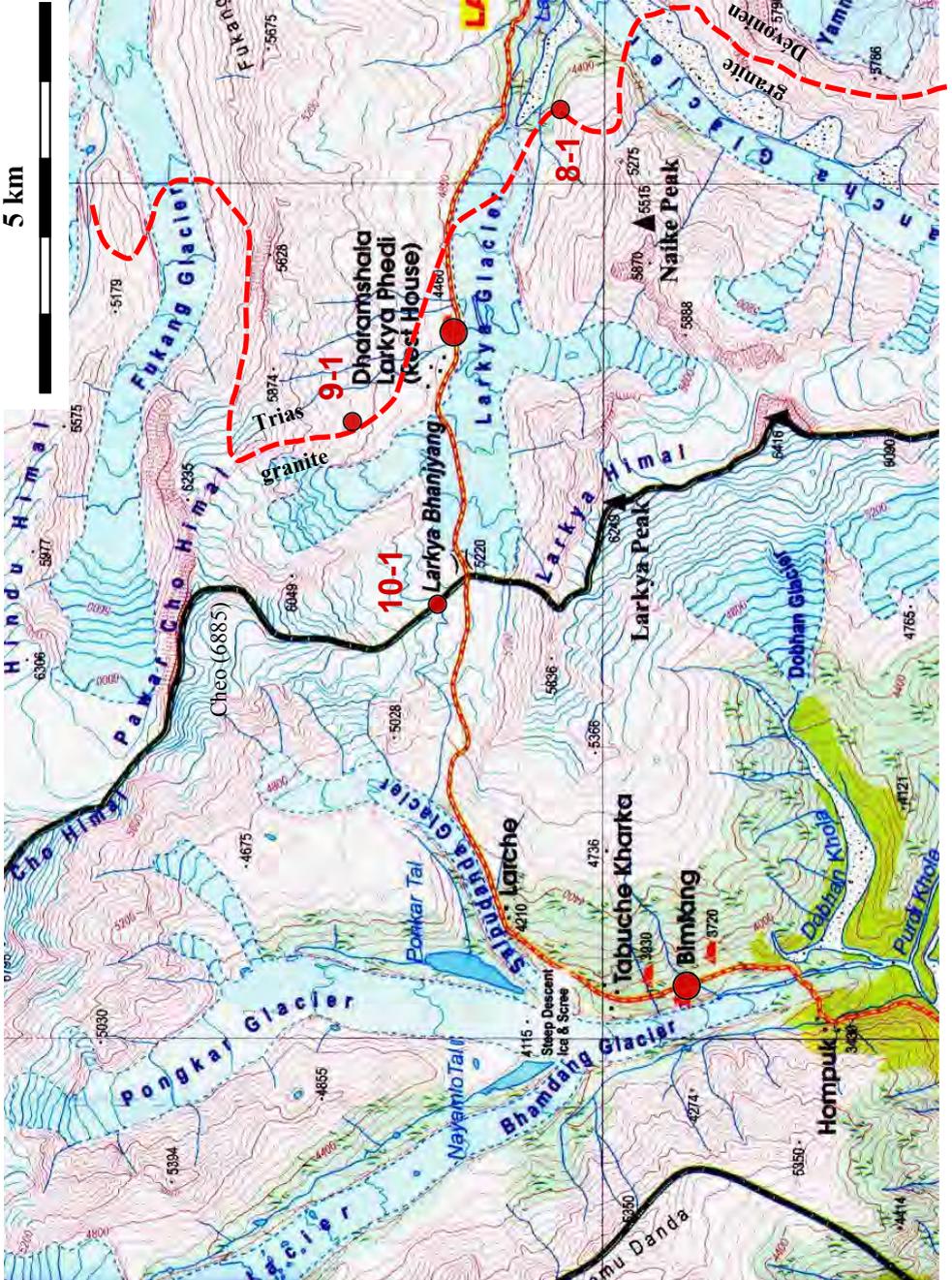
Du contrefort RG du glacier du Cheo, vers 5200m, vers le Nord-Ouest, le Cheo Himal (6885 m). Au premier plan, éboulis de Trias et de granite. Le contact est dans les affleurements au second plan. C'est ce contact qui se voit de manière très spectaculaire depuis le Larkhya (voir J10, photo p 83)



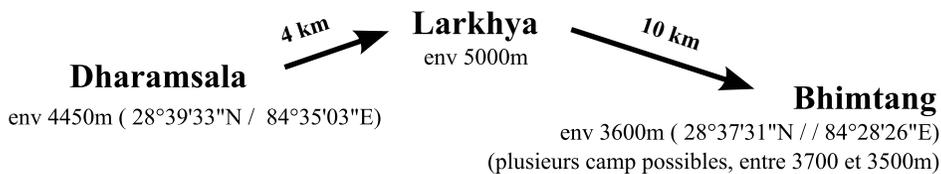
A gauche : du même endroit, vers le Sud, le glacier de Syanche et le sommet du Manaslu. Au premier plan, le Col du Larkhya. Enneigement encore fort, de printemps.

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





j10 - Mercredi 2 Novembre



Thème : Granite du Manaslu.

Passage du Col du Larkhya, début de la longue descente de 3 jours de la Dudh Khola puis de la Marsyandi. Dans toute cette descente, où les étapes sont assez longues, les arrêts seront un peu fonction de l'état de nos mollets !



Au col du Larkhya, vers le Cheo

10-1(28°39'52" / 84°31'30" / env 100m au dessus du col) - Crête au NNE du col, granite du Manaslu

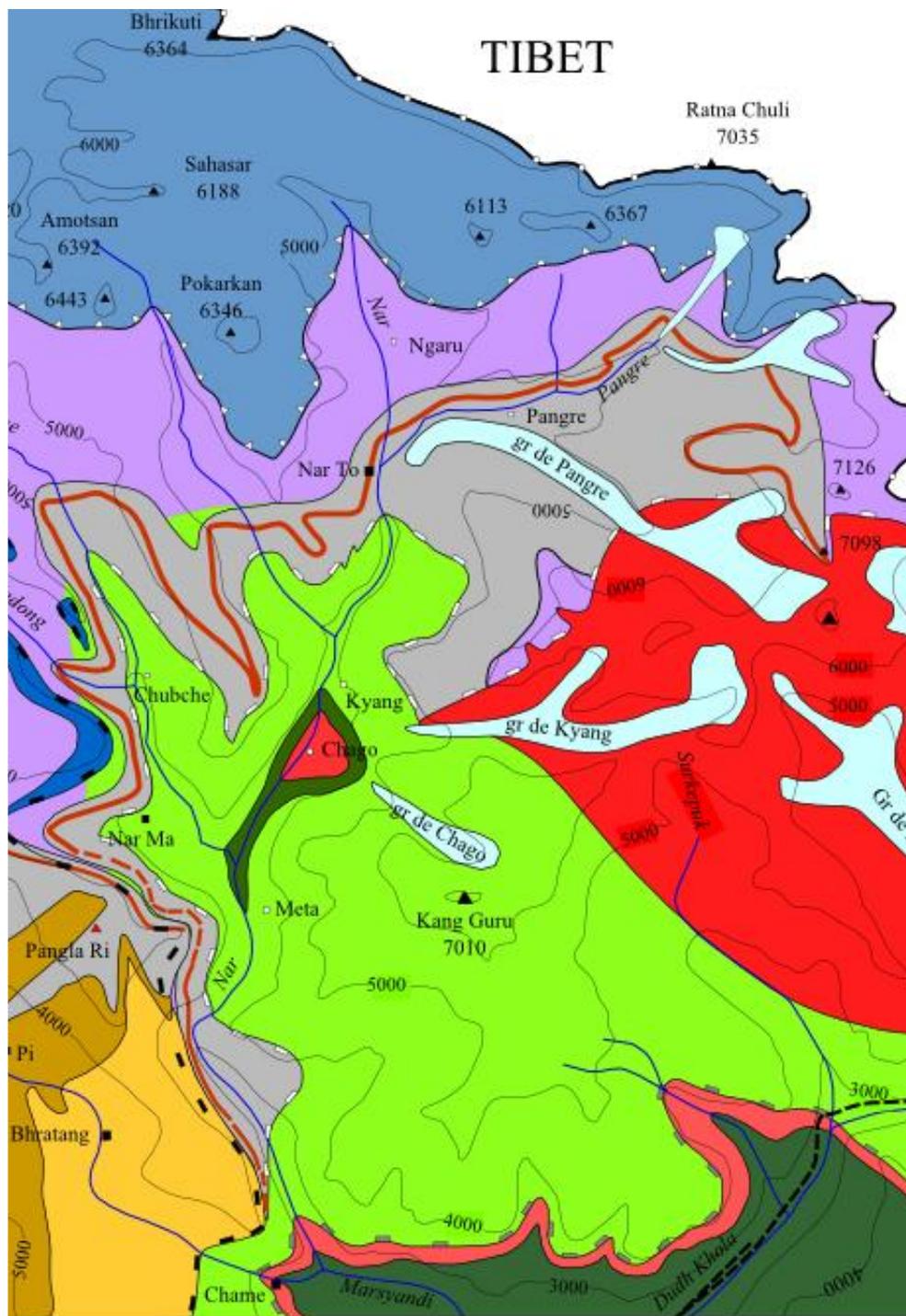


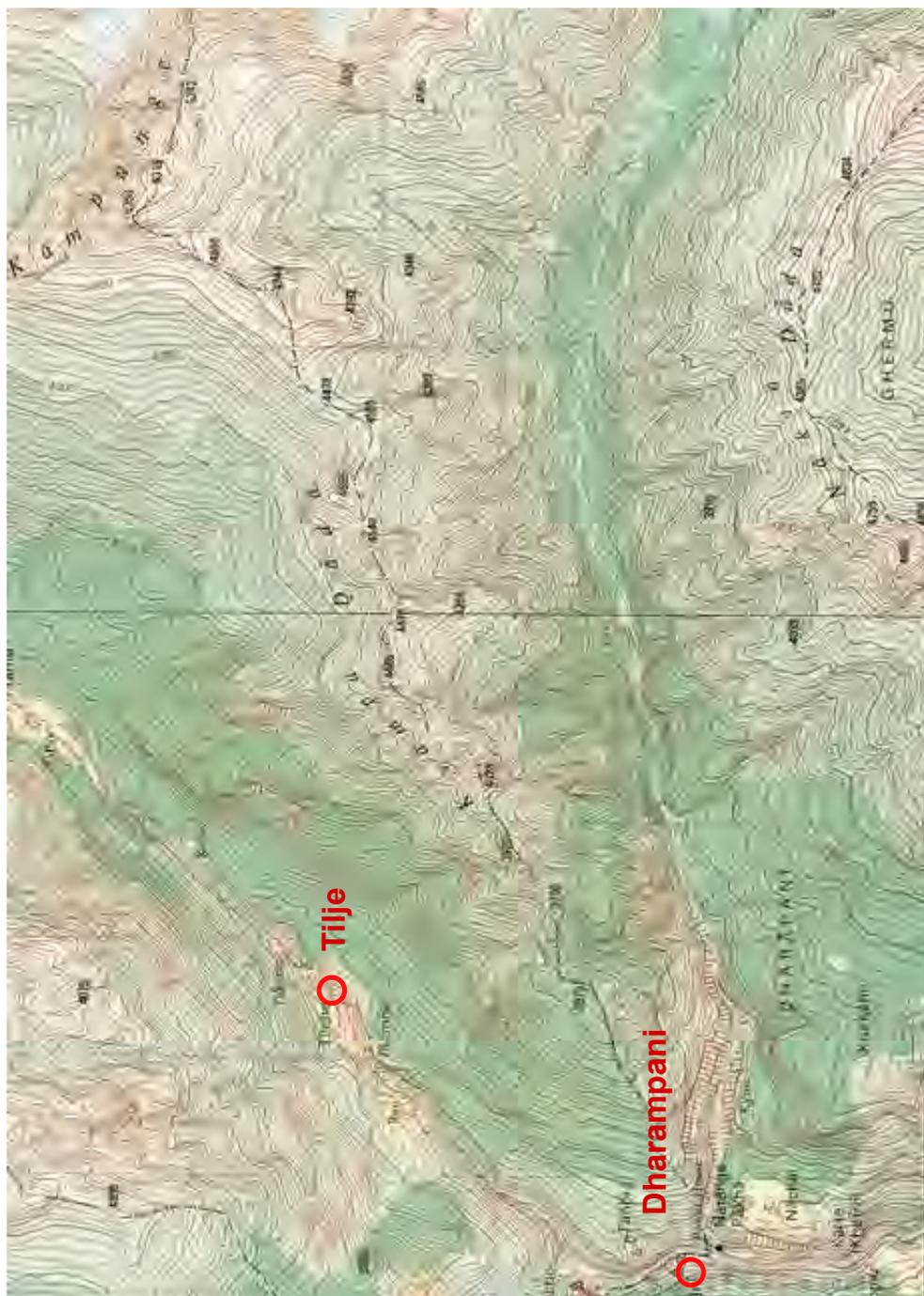
Le Cheo vu de l'arrêt 10-1

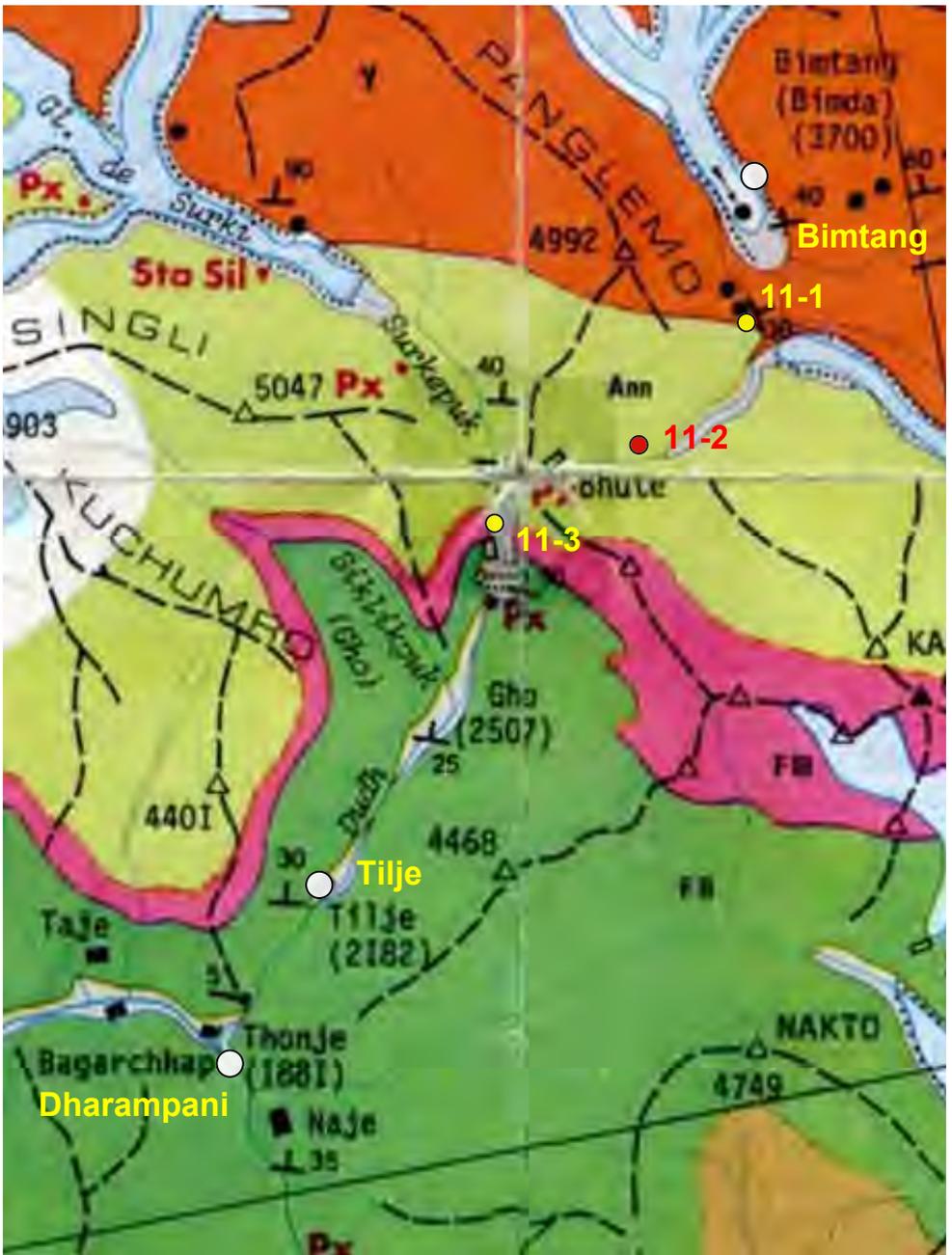


Du Larkhya, le contact granite-Trias en RG du glacier du Cheo

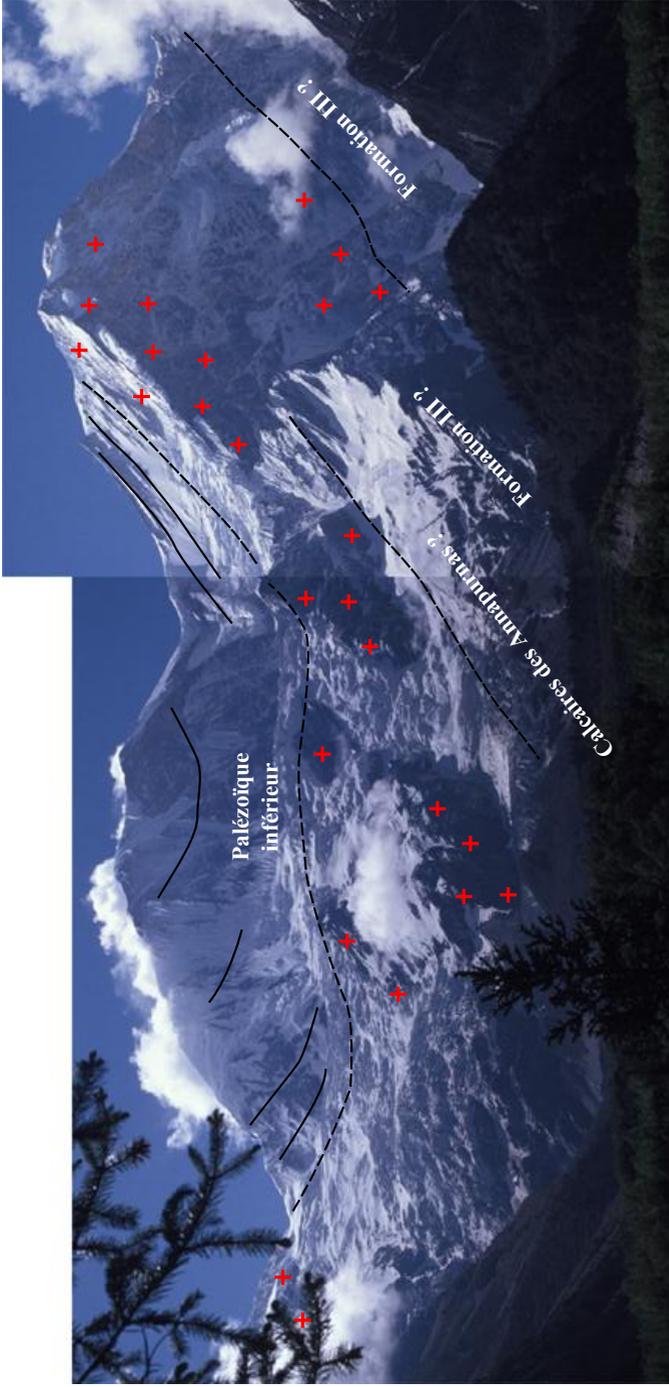
TIBET







Sur cette carte ancienne (et ayant beaucoup servi !) 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.84 et 85) donne une meilleure idée de la géologie de la zone.

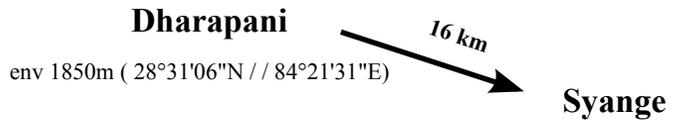


Arrêt 11-1 : en descendant la Dudh Khola, en aval de Bimtang, vers 3230m d'altitude, aperçu sur les versants W du Pic 7145 m (à gauche) et du Manaslu (à droite). Noter (i) que l'on peut voir ici à la fois le plancher et le toit du granite, (ii) les très nombreuses enclaves métasédimentaires dans le granite, et (iii) l'amorce du pli des Annapurnas

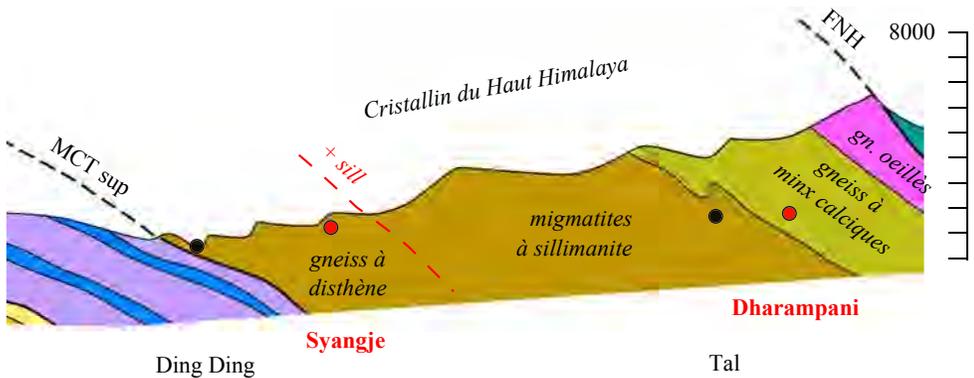


Détail de la partie droite de la photo ci-contre. En face W du Manaslu, on voit que le corps principal du granite est très hétérogène, fait d'un lavis d'injections se recoupant mutuellement, préservant de très nombreuses enclaves d'encaissant.

j12 - Vendredi 4 Novembre



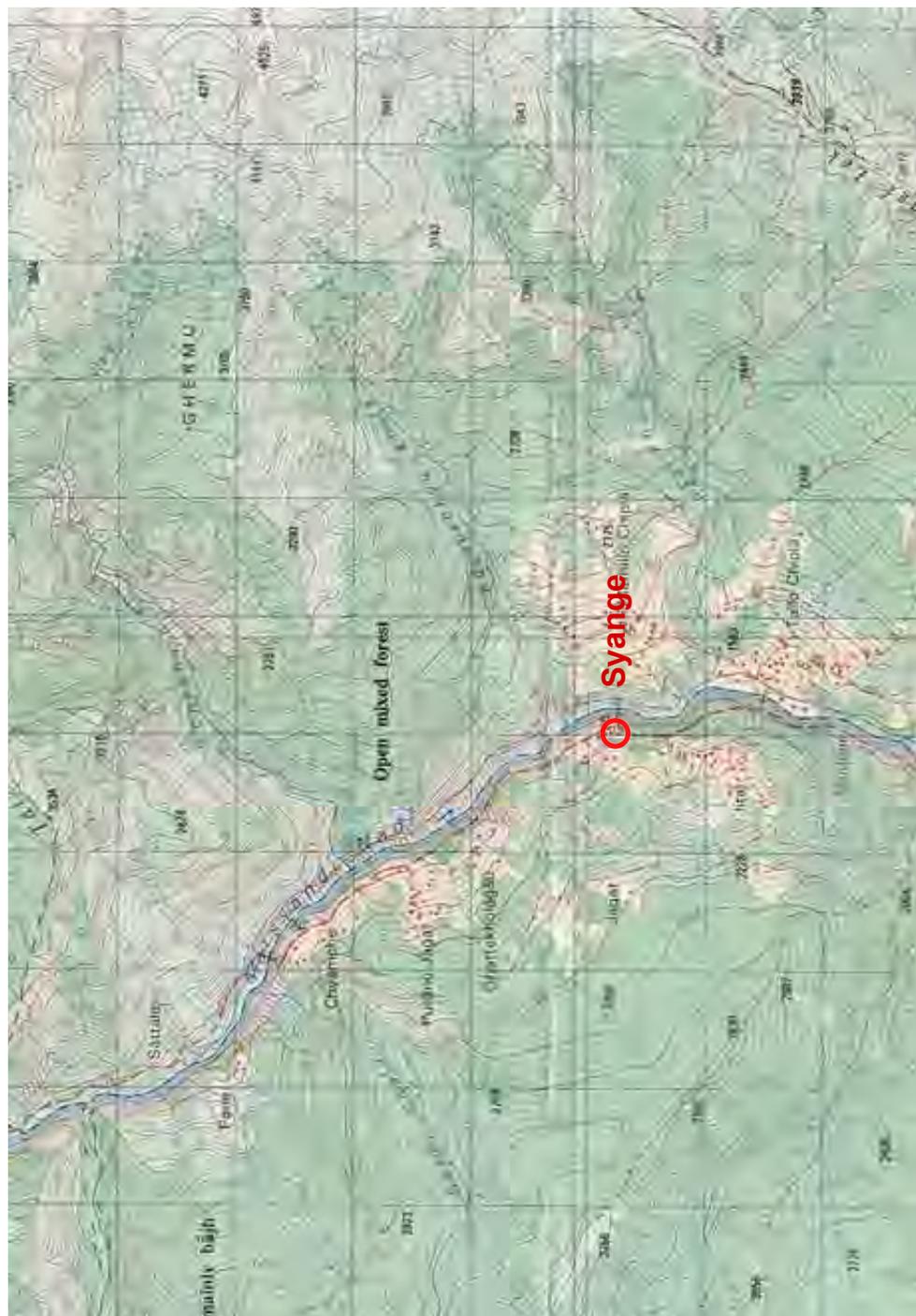
Thème : Partie médiane du CHH, gneiss à sillimanite, migmatisation



12-1(28°30'14" / 84°21'44") Au départ du chemin de Naje : gneiss calciques plissés, puis gneiss calciques à grenat.

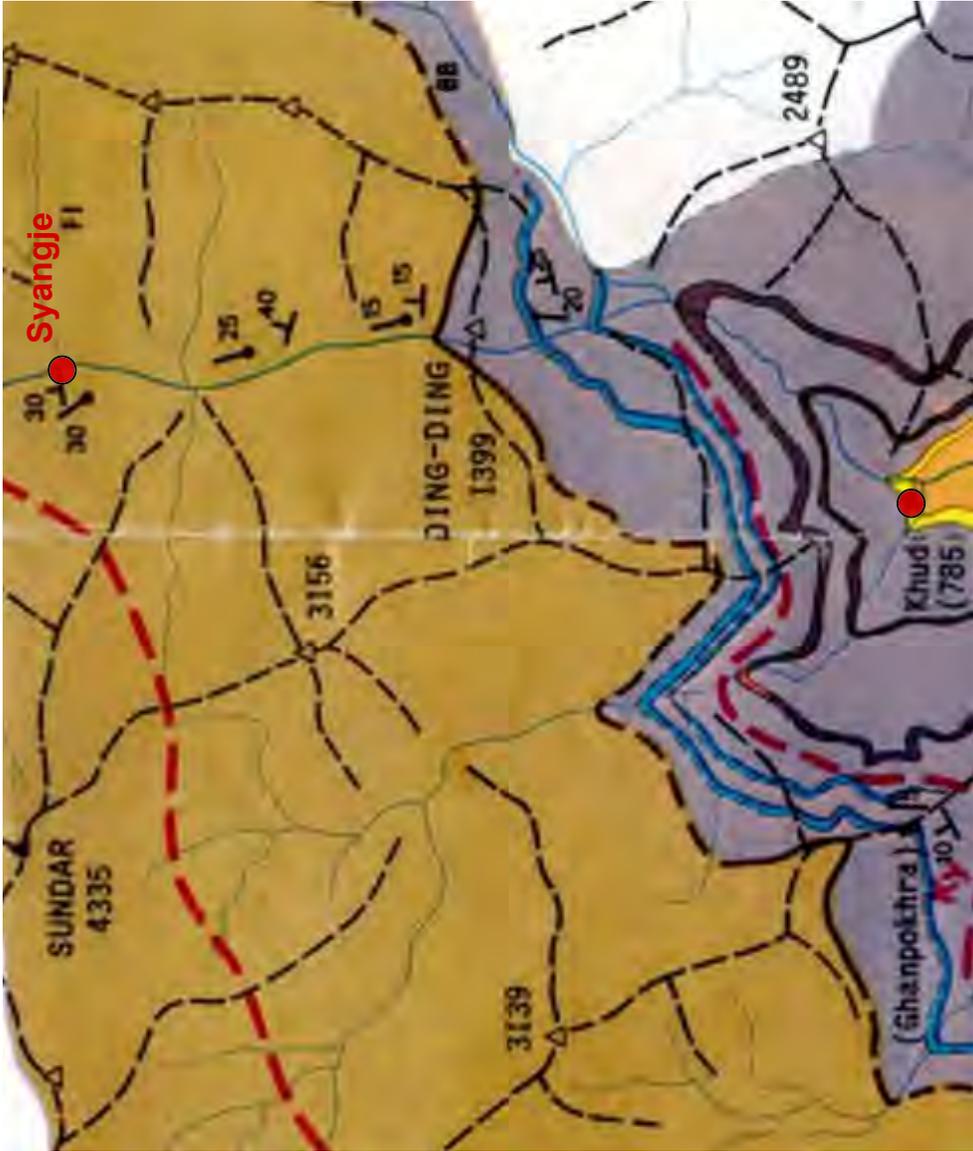
12-2(28°28'09" / 84°22'25") En aval du village de Tal et jusqu'au pont de Syangje : migmatites avec de nombreux cisaillements à sillimanite, et figures d'expulsion des mobilisats migmatitiques (voir p.45).





j12 - Vendredi 4 Novembre (3)

Carte géologique de la coupe Dharampani- Syangje - Khudi (Colchen et al., 1980)



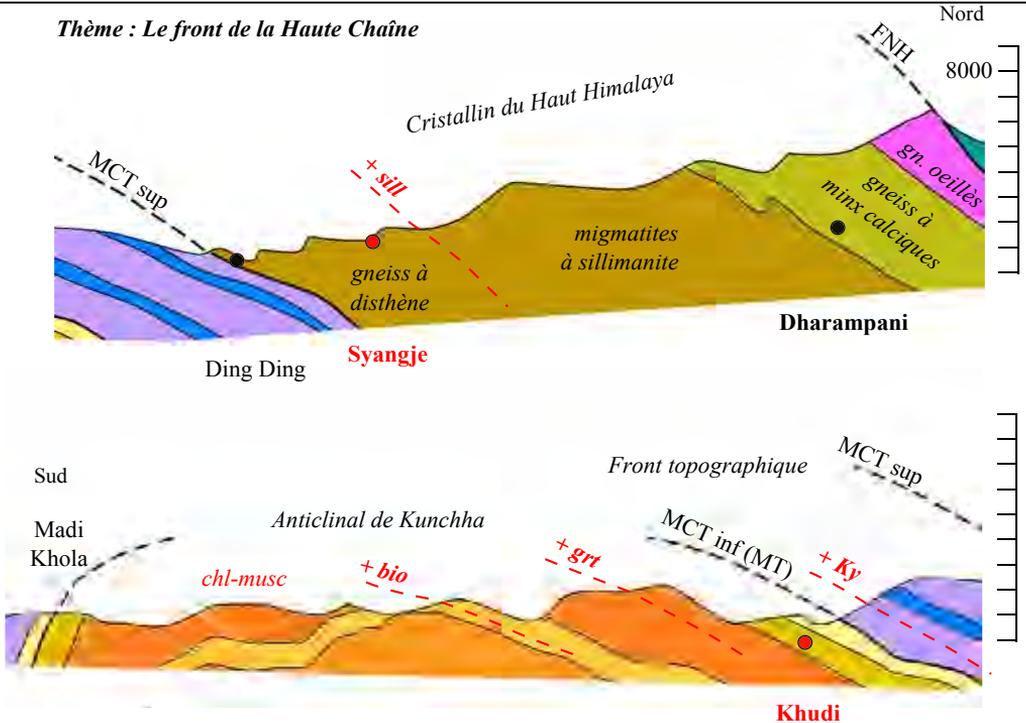


5 km

j13 - Samedi 5 Novembre



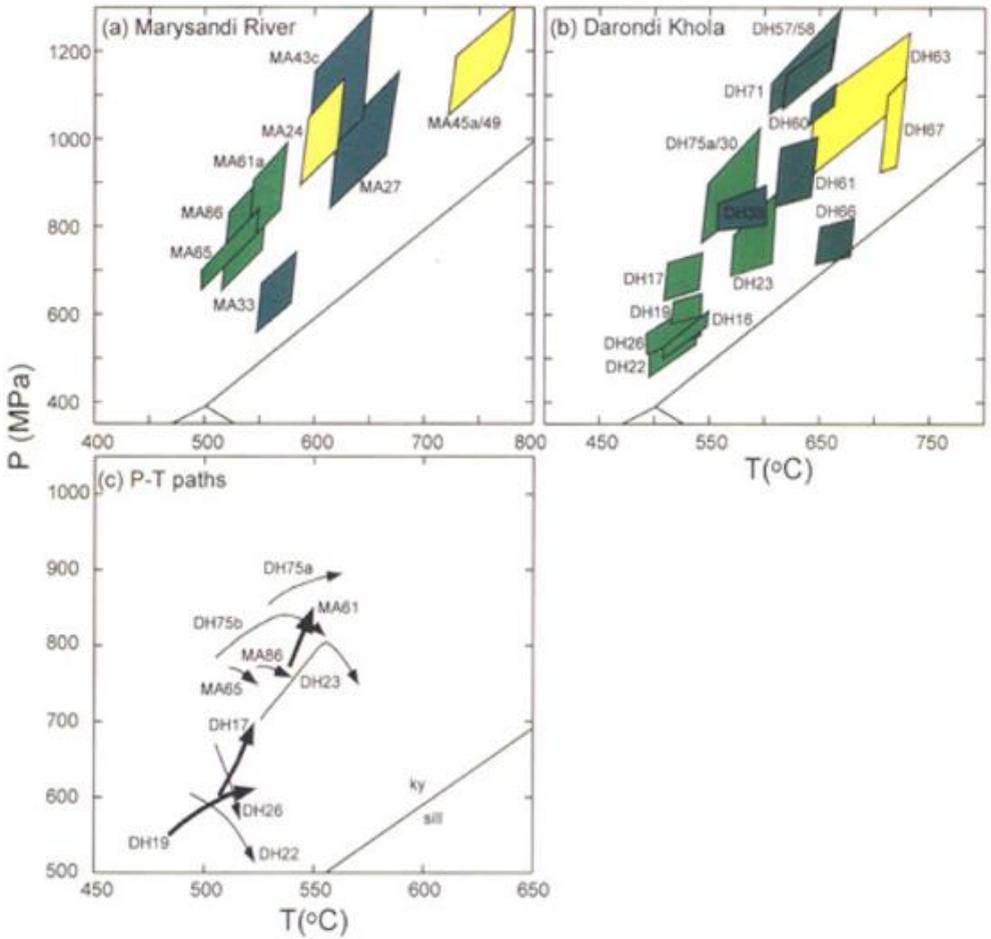
Thème : Le front de la Haute Chaîne



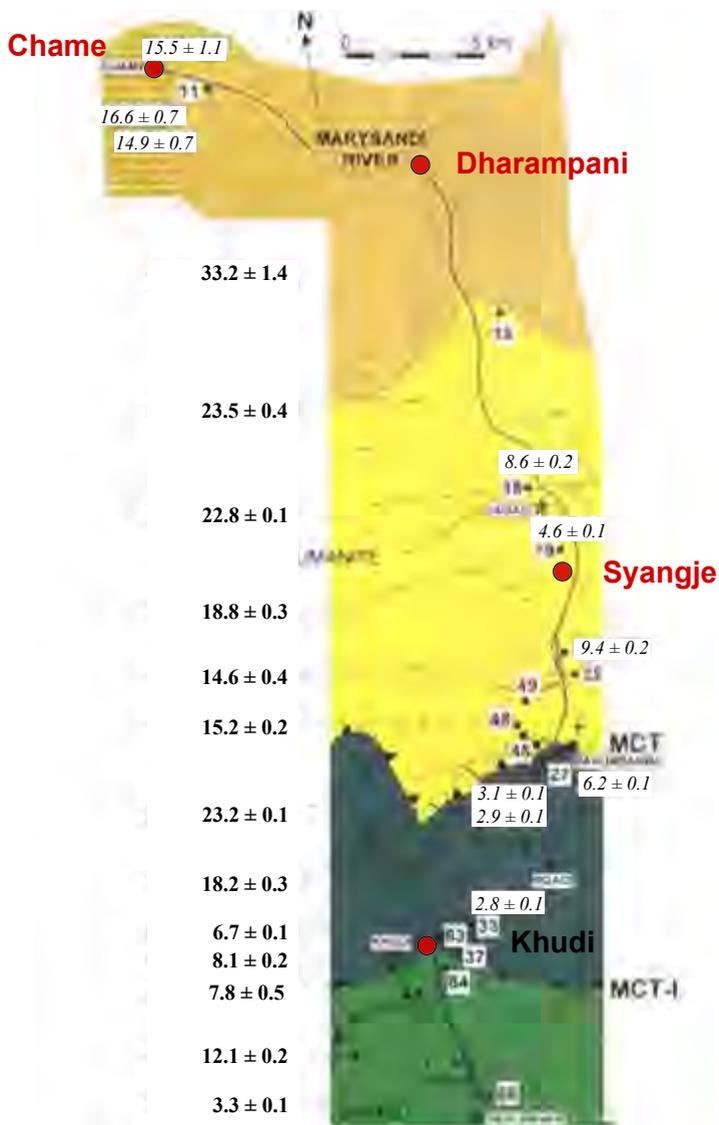
En principe, la descente de Syangje à Khudi devrait se faire en voiture pour la plus grande partie du trajet. Mais cela dépend beaucoup de l'état de la nouvelle route de la Marsyandi après la mousson. Il se peut qu'elle soit devenue impraticable, et que nous ayons à faire une journée de plus (ou certains tronçons) à pied. Si tel est le cas, nous n'aurons le temps que de quelques courts arrêts, puisque nous devons rentrer à Kathmandou le soir même.

Néanmoins cette descente est très intéressante à au moins deux points de vue, et même si aucun arrêt spécifique n'est prévu, nous ferons quelques stops "paysage" ou "joli caillou"... :

- on recoupe la zone du MCT, et son métamorphisme inverse. Pour la Marsyandi, on dispose contrairement à la Burhi de données assez récentes sur le métamorphisme et son âge (Catlos et al., 2001, voir p. 103),
- le front topographique de la chaîne a été bien étudié (Hodges et al., 2004, voir p. 104-105). 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.

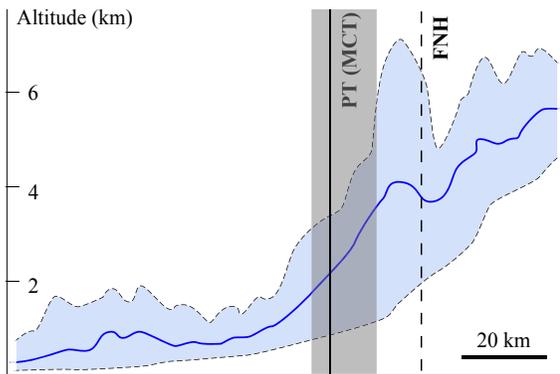
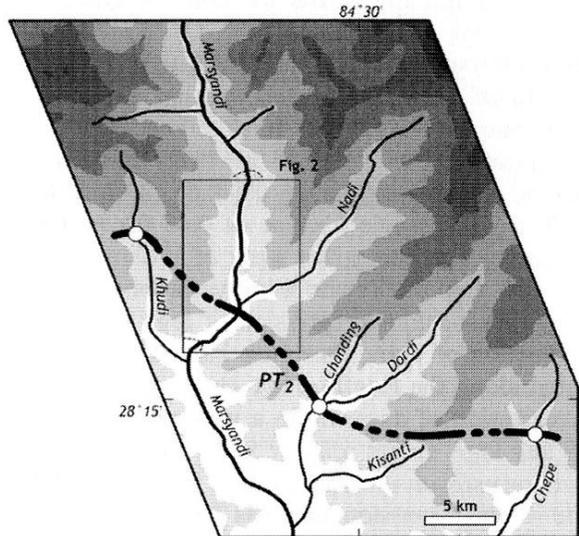


Conditions P-Tp dans les roches de la zone à grenat, dans la zone du MCT (en haut) et trajets P-Tp pour certains échantillons. On voit qu'il s'agit d'un trajet de cristallisation prograde (qui s'oppose au trajet rétrograde normalement enregistré au dessus du MCT) (Catlos et al., 2001)



Ages en Ma du métamorphisme en Marsyandi, dans le CHH et dans la zone du MCT (in Catlos et al., 2001). Ages Ar/Ar sur micas (en italique), et ages 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 (voir p. 31).

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)



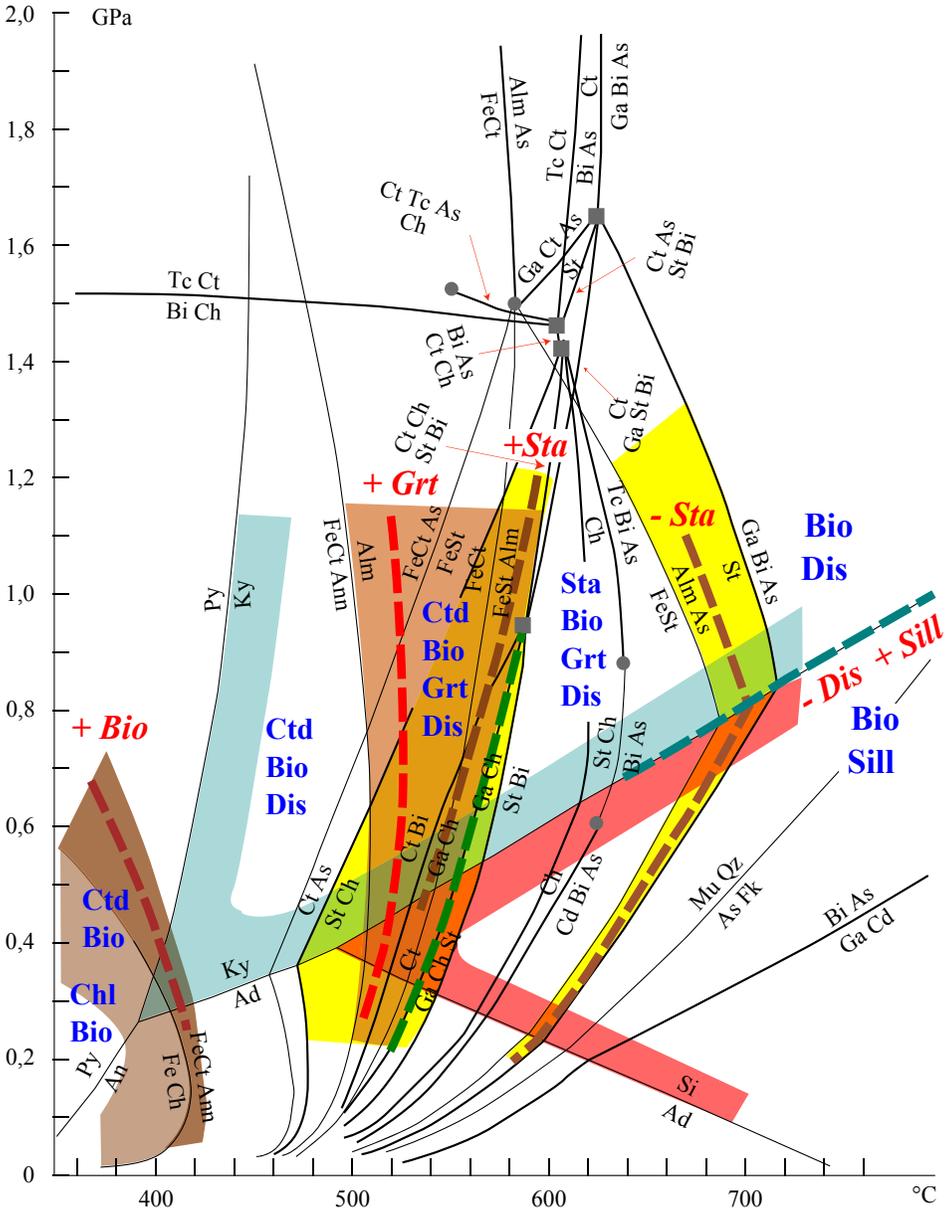
Le front de la Haute Chaîne (d'après Hodges et al., 2004).

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).



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

Annexe 4

Légende de la carte géologique Annapurnas-Manaslu-Ganesh

Colchen et al., 1980

Trois zones d'accident majeurs 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
	Ctd Chloritoïde
	Ky Disthène (kyanite)
	Grt Grenat
	Hb Hornblende
	Px Pyroxène
	Sil Sillimanite
	Sta Staurotide
	Wol Wollastonite

