



## SOMMAIRE DU LIVRET GUIDE

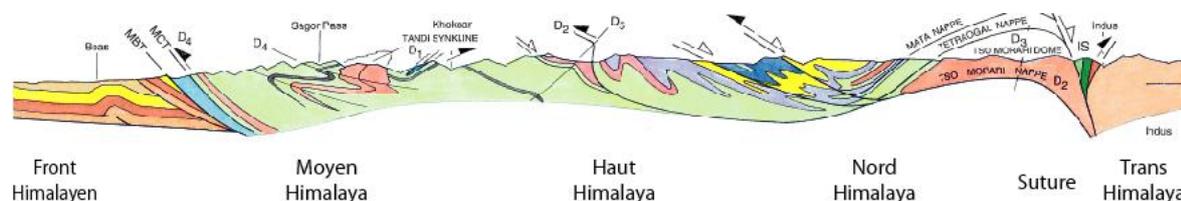
Programme général		
Introduction à la géologie de l'Himalaya		I-2 à I-21
Annexes 1 et 2 : cartographie, références		I-22
Annexe 3 : Grille métamorphique		I-25
La coupe Chandigarh-Ladakh : programme journalier		II

## PROGRAMME GÉNÉRAL

	18/7	Lyon - Delhi
	19/7	Journée à Dehli (altitude : 227 m)
<i>J1 traversée en train du front de la chaîne (MBT)</i>		
J1	20/7	Dehli - Shimla (2005 m), une journée de train
<i>J2 - J5 en voiture, nappes du Bas et du Haut Himalaya</i>		
J2	21/7	Shimla - Rampur- Saharan (2165 m)
J3	22/7	Saharan - Kalpa (2960 m)
J4	23/7	Kalpa - Tabo (3280 m)
J5	24/7	Tabo - Kibber (4270 m)
<i>J6 - J13 à pied, nappes du Nord Himalaya et dôme du Tso Morari (subduction continentale)</i>		
J6	25/7	Kibber - Dumla (4550 m)
J7	26/7	Dumla - camp de Thaltak (4875 m)
J8	27/7	Thaltak- Jagthap (4785 m) puis Bonrojen (5180 m)
J9	28/7	Bonrojen - <b>Parang La (5578 m)</b> - Dak Karzong (4940 m)
J10	29/7	Dak Karzong - Datang Yongma (Kharsa Gongma, 4725 m)
J11	30/7	Datang Yongma - Norbu Sumdo (4500 m)- Chumik Shilde (4550 m)
J12	31/7	Chumik Shilde - sud du Tso Morari (4550 m)
J13	1/8	sud du Tso Morari - Karzog (4620 m)
<i>J14-J16 en voiture, dôme du Tso Morari, ophiolites de Nidar, suture de l'Indus</i>		
J14	2/8	Kartzog - Mahe (4210 m) - lacs du Tso Kar (4560 m)
J15	3/8	Tso kar - Taglang La (5300 m) - vallée de l'Indus - Leh (3410 m)
J16	4/8	Leh et ses alentours
<i>J17 - J19 en voiture, le coté "Asie" de la collision : Transhimalaya, suture de Shyok</i>		
J17	5/8	Leh - Khardung La - vallée de la Nubra
J18	6/8	Dans la vallée de la Nubra
J19	7/8	retour à Leh
	8/8	vol Leh - Delhi
	9/8	vol Delhi - France

Note : au Nord du Parang La, les altitudes et les noms de lieux sont repris de la carte Ladakh-Zanskar au 1:150000 publiée aux Editions Olizane

## I - LA GÉOLOGIE DE L'HIMALAYA



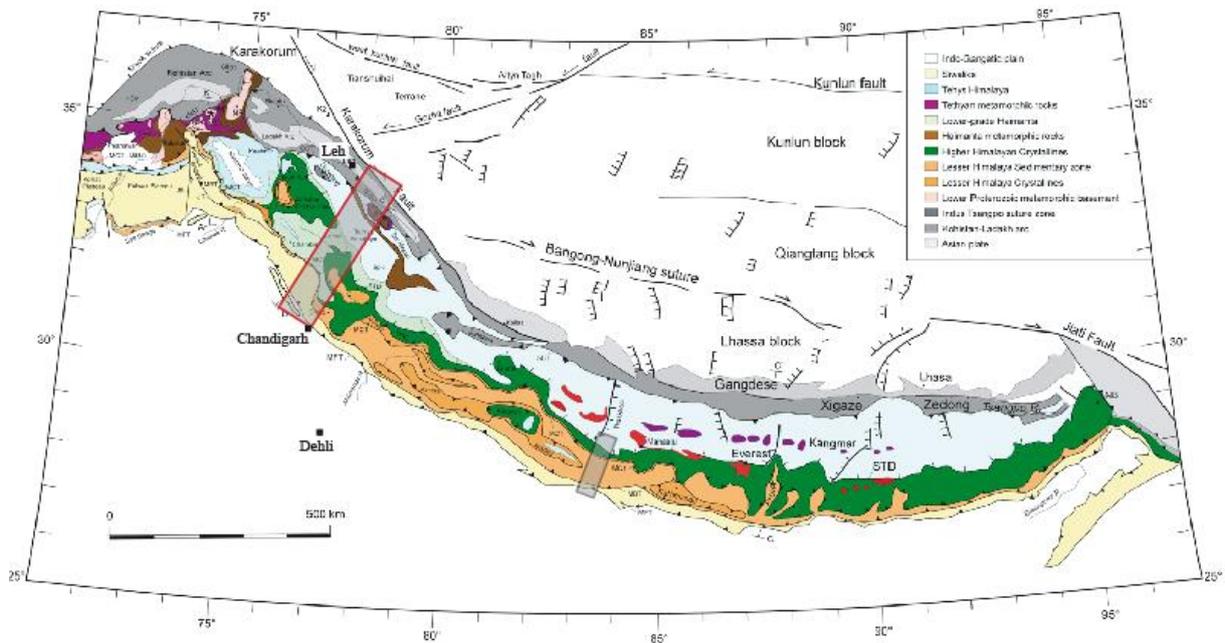
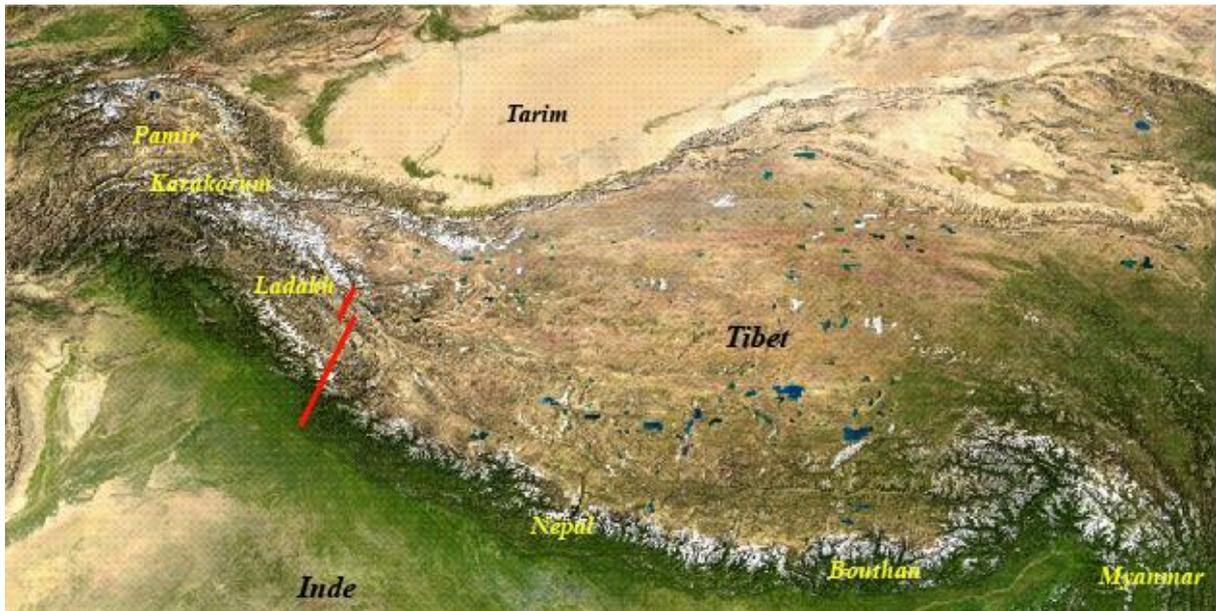
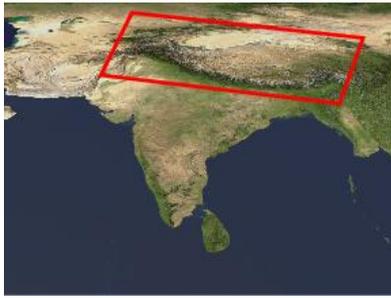
**Figure 1-1** -Les grandes unités morpho-structurales de l'Himalaya de l'Ouest

La coupe que nous ferons est assez exceptionnelle, car elle permet une traversée complète de toutes les unités de l'Himalaya, depuis le piémont avant-chaîne du Gange jusqu'au plateau tibétain, au Nord de la suture Inde-Asie.

On trouvera dans cette **première partie** du livret-guide un rappel succinct de la géologie de la chaîne himalayenne, qui s'appuie directement sur un livre paru chez Vuibert : "Himalaya - Tibet (la collision continentale Inde - Eurasie)", par G. Mascle, A. Pêcher et S. Guillot (2011). Vous pouvez vous y reporter pour une information plus complète. La **seconde partie** du livret décrit la géologie le long de notre trajet jour par jour et précise certains aspects particuliers de la géologie de l'Himalaya du Nord-Ouest.



**Figure 1-2** Image satellite oblique de l'Inde et du Tibet. Entre les deux, l'arc Himalayen. En rouge, notre section au Ladakh



**Figure 1-3** - En haut, MNT de l'ensemble Himalaya Tibet, et localisation de la coupe effectuée au Ladakh. En bas, carte géologique simplifiée, montrant les grandes unités géologiques de l'Himalaya. Jaune: Siwaliks; brun: Moyen Himalaya; vert: Haut Himalaya cristallin; bleu pâle: Haut Himalaya sédimentaire; gris: arc du Kohistan-Ladakh et zone de suture Indus-Tsangpo

L'Himalaya forme une longue chaîne (2500 km), d'orientation moyenne WNW-ESE (N 120°E), située au Nord de l'Inde. Cet arc orogénique qui s'élève depuis la plaine indo-gangétique et le delta du Brahmapoutre au Sud est limité au Nord par le plateau Tibétain et au Nord-Ouest par les montagnes du Karakorum. L'Himalaya se prolonge à l'Ouest par les chaînons beloutches (Afghanistan et Pakistan) et à l'Est par les chaînons du Myanmar (Arakan Chin).

L'Himalaya représente l'ensemble orographique le plus élevé de la Terre, avec dix sommets dépassant 8000 m d'altitude. L'Everest est le point culminant de la Terre, à 8848 m. En sanskrit, un HIMAL est une montagne blanche, c'est-à-dire toujours enneigée (Kangri en Tibétain). Sous les latitudes du Nord de l'Inde, la limite des neiges éternelles se situe au-dessus de 5500 m d'altitude.

Vers l'Ouest, au Nord du Pakistan, le relais est pris par le Karakorum, dont quatre sommets dépassent 8000 m (K2, 8611 m). Karakorum dans le langage turco-mongol signifie montagne noire. En effet, dans cette région moins arrosée par la mousson, les montagnes sont désertiques ; la limite des neiges éternelles se situe encore plus haut, vers 6500 m. Cela n'empêche pas la présence ici des plus grands glaciers de vallée de la chaîne (Batura, Hispar, Biafo, Baltoro, Siachen, tous faisant de 60 à 70 km de long)

L'ensemble Himalaya-Karakorum borde au Sud le plateau tibétain, d'altitude moyenne proche de 5000 m. Le Tibet représente le plus vaste haut-plateau terrestre (superficie  $4 \cdot 10^6$  km<sup>2</sup>). L'ensemble Himalaya-Karakorum-Tibet (HKT) constitue donc le plus vaste relief de notre planète.

La chaîne himalayenne, située entre les deux blocs continentaux que constituent l'Asie au Nord et l'Inde au Sud, résulte de la collision de deux marges continentales jadis séparées par un espace océanique. L'Himalaya est une chaîne encore très active, les blocs continentaux se rapprochant de nos jours à une vitesse de l'ordre de 4 à 5 cm/an.

## **Morphologie**

La chaîne himalayenne forme une barrière d'une largeur moyenne de 300 km au Nord du bloc Indien. On distingue du Sud au Nord plusieurs ensembles morphologiques contrastés, un peu moins nets en Himalaya du Nord-Ouest.

- Un premier ensemble correspond à la plaine du Terai, parcourue par les grands fleuves indiens et leurs affluents, en particulier par le Gange qui coule parallèlement à la chaîne, l'Indus à l'Ouest et le Brahmapoutre à l'Est. L'altitude moyenne y est très faible, environ 100 m, avec un seuil au niveau du Punjab (au NW de Dehli, voir fig. 2-1) qui sépare les bassins versants de l'Indus et de son affluent principal, la Sutlej de celui de la Yamuna et des Ganges. La bordure nord du Terai, aux pieds même de la chaîne, est constituée par une série de cônes alluviaux coalescents, de dimensions variables, qui jalonnent les rivières issues de la chaîne.

- Un second ensemble morphologique est constitué par une série de collines boisées, d'altitude variant entre 250 et 800 m. C'est le domaine Siwalik (du nom d'un chaînon du Punjab, au Nord-Ouest de Dehli). Ce domaine est constitué de crêtes parallèles, séparées par des dépressions remplies de sédiments qui constituent les Duns. Sa largeur varie de 2 à 60 km (en moyenne de l'ordre de 10 km).

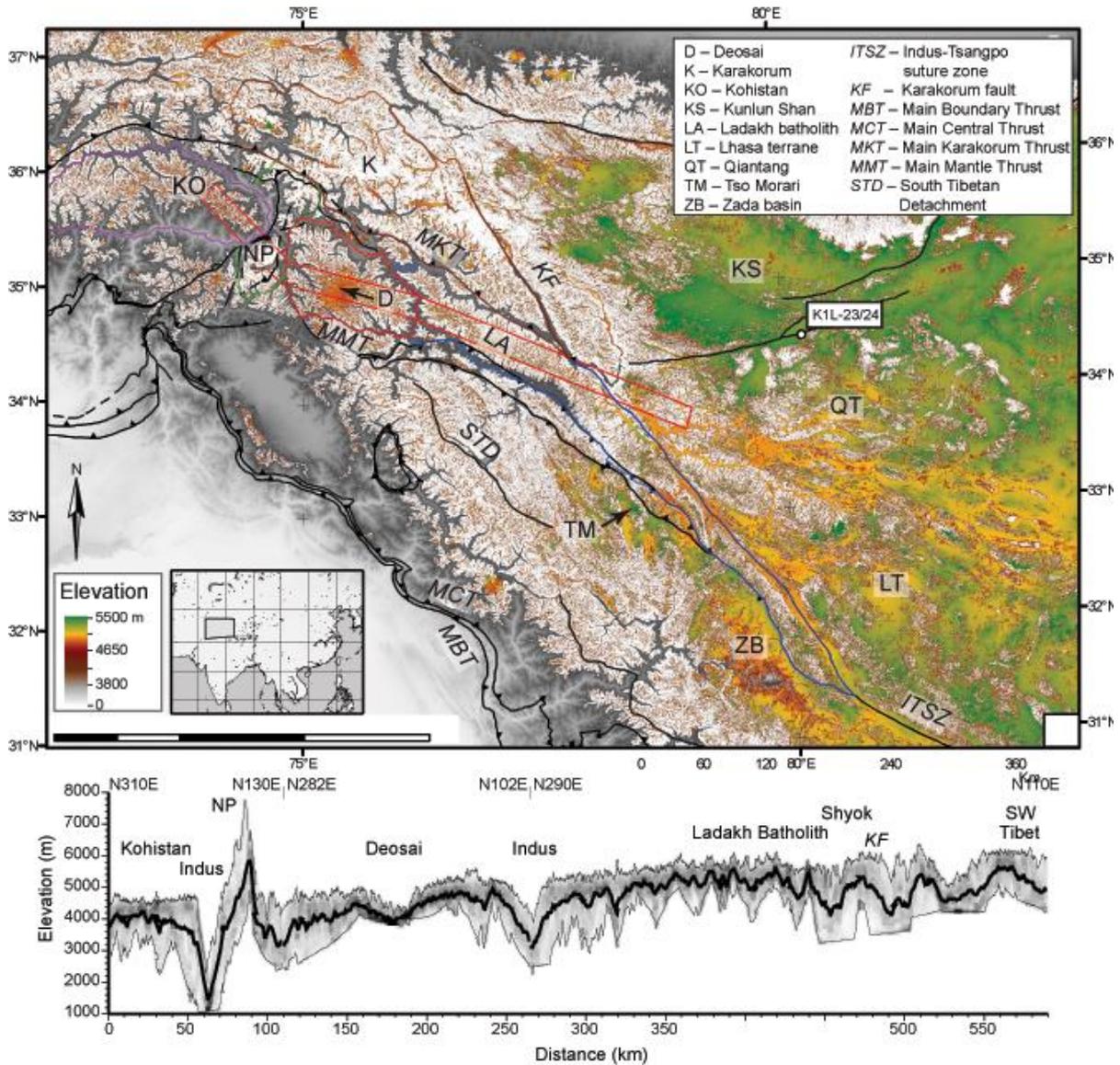
- Un troisième ensemble morphologique est constitué par le Moyen-Pays (Moyen-Himalaya, Midlands). Sa bordure Sud forme un relief élevé dominant les Siwalik : la chaîne de Pir Panjal au Cachemire (Kashmir), qui atteint 5500 m d'altitude, la chaîne du Mahabharat au Kumaon et au Népal, qui atteint 2500 m d'altitude. Cet ensemble est profondément entaillé par les grandes rivières himalayennes, avec parfois de grands bassins perchés à 1500-2000 m d'altitude (bassin de Srinagar au Cachemire, bassin de Kathmandu au Népal).

- Un quatrième ensemble morphologique est constitué par la Haute Chaîne, avec tous les hauts sommets, et relativement englacée. Elle forme une barrière pratiquement continue, qui arrête l'essentiel des précipitations de la mousson de mi-juin à mi-septembre. Les grands fleuves indiens et leurs affluents y prennent leurs sources. L'altitude de la Haute Chaîne diminue en Himalaya de l'Ouest.

- Au Nord, les hauts plateaux tibétains, qui se développent sur plus de 1000 km du Sud au Nord, correspondent à une zone relativement aride et morphologiquement complexe. Il s'agit d'une succession de plateaux d'altitude élevée, proche de 5000 m en moyenne, accidentée par des dépressions relatives à environ 4000 m (vallées du haut Indus, de la Shyok, du Tsang Po ou du Chang Jiang-Yang Tse,...), et par des chaînes élevées (Ladakh, Gangdese, Nyenqentangla, Tanggula, Kun

Lun,...) culminant à des altitudes situées entre 6000 et plus de 7000 m. Au NW, ces hauts plateaux dominent la dépression du Tarim, bassin endoréique désertique d'altitude moyenne 800 m. Cette dépression se poursuit vers l'Est par le désert de Gobi. À l'Est, la dépression est séparée des Hauts Plateaux Tibétains par le bassin perché du Qsaidam (Tsaidam), d'altitude moyenne 2500 m, et la chaîne d'Altyn Tagh.

Des études récentes montrent que la partie Sud du plateau Tibétain existait dès l'Eocène. Il s'étendait sans doute plus largement vers l'Ouest, mais a été repris et morcelé par la tectonique et le soulèvement très hétérogène de l'Himalaya de l'Ouest et du Karakorum.



**Figure 1-4** - Les restes de l'ancien plateau sud tibétain en Himalaya du Nord-Ouest. Profil topographique moyenné sur une bande de 10 km de large passant par le Tibet, les montagnes du Ladakh au Nord de la suture de l'Indus, le plateau de Déosai, le Nangat Parbat et le Kohistan. Cette morphologie a sans doute été acquise pour l'essentiel il y a plus de 30 Ma, exception faite du Nanga Parbat (8125 m), un relief très jeune (surrection de plusieurs mm/a encore active) (Van der Beek et al., 2009).



**Figure 1-5** - Vue vers l'E du plateau de Déosai (4000 à 4500 m d'altitude), au Ladakh pakistanais. Il s'agirait d'un fragment de plateau Tibétain préservé au sein de l'Himalaya.

## **Données géophysiques.**

### *Cinématique*

Reportées par rapport à une Eurasie stable, les observations GPS fournissent des vecteurs de convergence orientés au NNE, et des vitesses de l'ordre de 40 à 50 mm/an entre l'Inde et l'Eurasie et de 20 mm/an au niveau du front orogénique himalayen ; ces vitesses correspondent au déplacement de la plaque indienne par rapport à l'Eurasie. Ces valeurs décroissent au sein de la chaîne himalayenne, montrant qu'une partie du déplacement est absorbée par la déformation intra-continentale. Ces données montrent également que la déformation est active au niveau du Qsaidam et du Tian Shan, et que le Tibet tend à se déplacer vers le NE en chevauchant, et repoussant vers l'ESE, le bloc de Chine du Sud; ce bloc de Chine du Sud se déplace lui-même vers l'ESE. Ainsi, le séisme très meurtrier du Sichuan du 12 mai 2008, traduit ce déplacement vers l'Est du Tibet Central.

### *Sismologie*

L'Himalaya-Tibet est le siège d'une sismicité importante avec des magnitudes fortes ( $\geq 8$ ). Les séismes sont majoritairement superficiels et dessinent une surface plongeant faiblement vers le Nord, sous la chaîne himalayenne, sauf dans l'Ouest (Karakorum-Hindu Kush), où existent des foyers intermédiaires dessinant une surface de Benioff plus pentée, plongeant vers le Nord jusqu'à 150 km de profondeur.

### *Tomographie sismique*

Les profils d'échelle globale (jusqu'à 2400 km de profondeur) montrent la présence de plusieurs zones d'anomalies de vitesse négative, interprétées comme autant de traces des plaques lithosphériques océaniques et continentales, successivement subduites, puis détachées, au cours de l'édification de l'ensemble des chaînes d'Asie centrale, et donc en particulier du système Himalaya-Tibet.

Les profils sismiques d'échelle lithosphérique montrent le plongement vers le Nord, sous la chaîne himalayenne, du MOHO indien et de la croûte inférieure Indienne, jusqu'à la latitude de la suture de l'Indus-TsangPo. Au Nord de cette suture, la limite du MOHO demeure à peu près horizontale, à une profondeur de l'ordre de 75 km, sur près de 200 km. Un autre réflecteur est observable vers 60 km de profondeur, il se situe dans le prolongement Nord de la limite entre la croûte supérieure et inférieure indienne. Ce dispositif suggère que la croûte inférieure indienne est sous-charriée sur près de 200 km, sous la croûte inférieure du bloc de Lhasa ; il implique que la croûte supérieure indienne soit scalpée et expulsée vers le Sud pour former la chaîne himalayenne épaissie. Plus au Nord, le MOHO remonte très légèrement pour se situer vers 65 km.

## Grands ensembles géologiques

### Le bouclier indien

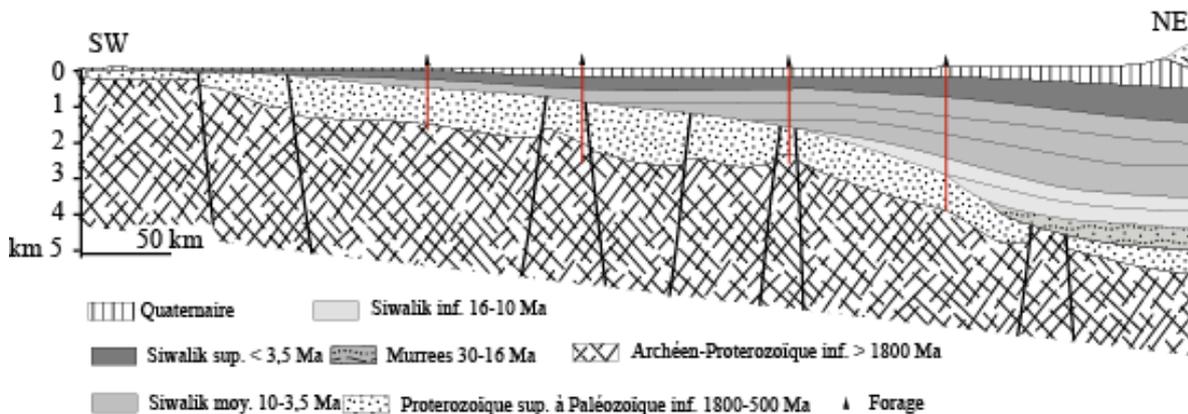
La péninsule indienne est constituée par une très ancienne croûte continentale, affleurante dans le Sud, et masquée sous les alluvions des plaines du Gange et de l'Indus au Nord et Nord-Ouest. Cette croûte est formée d'une mosaïque de blocs structurés en plusieurs étapes, depuis l'Archéen (3775 Ma pour les Older Metamorphic Tonalitic Gneiss) et pendant tout le Protérozoïque (avec en particulier la mise en place de séries sédimentaires et volcaniques de l'ensemble Aravalli-Delhi, structurées en plis d'axes NNE-SSW à l'Ouest de Delhi). La stabilisation de la croûte continentale du bouclier indien a été réalisée dès 900 Ma, et il n'a pas été affecté par les déformations panafricaines.

Au cours du Paléozoïque (542-251 Ma), l'Inde constitue un domaine continental stable. Hors des régions himalayennes, on n'y connaît pas de formations du Paléozoïque inférieur. À partir du Carbonifère supérieur (320 Ma), le bloc indien commence à se fracturer, en même temps que l'ensemble du Gondwana. A noter une glaciation carbonifère (Talchir Boulder Beds), et une période subtropicale au Permien-Trias caractérisée par le dépôt de charbons gondwaniens (bassin houiller de Damodar, NE de l'Inde).

L'ouverture de l'Océan Indien débute par l'ouverture du canal de Mozambique au Jurassique moyen (165 Ma). La marge correspondante a été incorporée aux chaînes du Balouchistan (Pakistan W), lors de la collision tertiaire. La plate-forme a enregistré les transgressions eustatiques du Jurassique et du Crétacé: on retrouve des sédiments carbonatés et argilo-carbonatés, à faciès de plate-forme dans le NW de l'Inde (Rajasthan, péninsule de Katiawar et Kutch), avec les couches très fossilifères d'Umia où alternent des faciès marins et continentaux du Portlandien-Néocomien (145-125 Ma). Vers 155 Ma, l'Inde se sépare de l'ensemble Australie-Antarctique et de Madagascar. La séparation est complète vers 100 Ma.

Au Crétacé supérieur-Paléocène se mettent en place les traps : traps de Rajmahal (100 Ma, Inde du NE), trace sur le continent Indien du point chaud de Saint Paul; traps du Deccan, masse de basaltes alcalins, épaisse de plus de 1000 m, mise en place très rapidement (1 à 2 Ma) à la limite Crétacé-Paléocène, liés au passage de la partie Ouest de l'Inde au-dessus du point chaud de la Réunion, lors de sa dérive vers le Nord.

### *La plaine indo-gangétique*



**Figure 1-6** - Progradation en onlap des séries du bassin du Ganges sur le substratum indien. A l'Eocène, la limite sud du bassin se situait au niveau du front actuel de la chaîne himalayenne. A l'Oligo-miocène, elle se trouvait entre 20 et 40 km plus au Sud. Pour le bassin Siwalik miocène, elle est passée de 50 à 60 km au Sud pour les niveaux inférieurs, à 150 km pour les niveaux moyens, et à plus de 200 km pour les niveaux supérieurs.

Il s'agit d'un bassin sédimentaire continental d'âge néogène à quaternaire à remplissage fluviatile. On distingue au Nord, au pied de la chaîne, une zone constituée de la coalescence de cônes fluviatiles, et au Sud un vaste domaine caractérisé par des cours d'eau méandriques, et traversé par des cours d'eau majeurs à chenaux anastomosés. L'épaisseur du remplissage, faible en bordure du plateau indien, peut atteindre 8 km au pied de la chaîne Himalayenne. Le remplissage Oligocène-Néogène-Quaternaire montre une série de corps progradants (avançant) en direction du Sud, en onlap sur le substratum, illustrant la progradation typique d'un bassin flexural. Ce bassin recoupe obliquement les structures précambriennes Aravalli-Delhi et Satpura..

### La chaîne himalayenne

La chaîne himalayenne est constituée d'unités structurales, qui se succèdent du Sud au Nord, et qui sont séparées les unes des autres par des discontinuités majeures. Ce sont (fig 2) :

- Les Siwalik, limités au Sud par le chevauchement frontal (MFT: Main Frontal Thrust).
- Le Moyen-Himalaya, qui chevauche les Siwalik au niveau du chevauchement bordier MBT,
- Le Haut-Himalaya, qui chevauche le Moyen-Himalaya au niveau du MCT (Main Central Thrust),
- La série sédimentaire plissée (Téthys Himalaya), découpée en une série de nappes. En Himalaya central, elle est détachée du substratum cristallin du Haut Himalaya le long de la faille nord himalayenne (FNH) (ou "détachement sud tibétain", STDS),
- Les unités de la suture Indus-TsangPo (ou ITSZ), qui marquent la limite Nord avec le continent asiatique, chevauchant vers le Sud les unités du "Téthys Himalaya", et rétrochevauchées vers le Nord sur la marge tibétaine.

#### *Les Siwalik*

Les Siwalik correspondent à un puissant ensemble détritique fluviatile de type molassique, d'âge néogène à quaternaire, dépassant 6 km d'épaisseur, subdivisé en Siwalik inférieur, moyen et supérieur.

- La série inférieure est constituée de l'alternance de grès assez fins, à rares intercalations conglomératiques, et de pélites contenant des paléosols à concrétions carbonatées. Au Népal, elle est datée entre 15,8 et 9,8 Ma par paléomagnétisme. Les faciès correspondent à des dépôts de rivières anastomosées et méandriques et de plaine d'inondation. Le matériel détritique provient du Nord ; il est essentiellement issu de séries protérozoïques peu métamorphiques. Les premiers remaniements de minéraux métamorphiques de haut grade apparaissent dans le haut de la série (disthène vers 13 Ma).

- La série moyenne, datée par paléomagnétisme entre 9,8 et 3,3 Ma, est constituée par une alternance de bancs de grès très épais (jusqu'à 50m) et de pélites argileuses à paléosols. Les intercalations conglomératiques sont fréquentes. Les niveaux gréseux correspondent à des remplissages de chenaux érosifs profonds de rivières en tresse à forte charge. Les niveaux de paléosols gris indiquent des zones mal drainées. Les directions de paléocourants signalent globalement un transport vers le Sud. Les bancs de grès sont très riches en muscovites, biotites, feldspaths et tourmalines; ils contiennent une proportion croissante vers le haut de la série de minéraux d'origine métamorphique (grenat, disthène, sillimanite à partir de 8 Ma). Les datations (Ar/Ar sur phyllites et feldspaths potassiques, U-Pb sur zircons) montrent que les séries métamorphiques himalayennes contribuent sensiblement au matériel détritique avec des temps de retard ("lag time" : durée séparant la cristallisation du dépôt sédimentaire) assez brefs de l'ordre de 4 à 6 Ma. Le matériel détritique provient donc du Nord, et l'érosion intéresse des séries métamorphiques de haut grade.

- L'unité supérieure est constituée essentiellement de conglomérats grossiers et épais, interstratifiés dans des sables et grès argileux. Les galets sont surtout formés de quartzites, carbonates, gneiss et granites qui proviennent de sources situées dans le Moyen et le Haut-Himalaya, mais aussi du remaniement des faciès Siwalik. Ces niveaux sont datés entre 3,3 et 1 Ma par paléomagnétisme, et au Pakistan par des intercalations de tufs volcaniques. Le milieu de dépôt correspond à des cônes alluviaux parcourus par un système de rivières en tresses.

Les Siwalik ont fourni une riche faune de Vertébrés, dont plusieurs Hominoïdes, et une abondante flore tropicale.

Les Siwalik forment un ensemble d'écaillés à pendage Nord ("fold and thrust belt"), chevauchant vers le S ou le SSW le Quaternaire gangétique, le long du "chevauchement frontal" (MFT ou MST, "*Main Frontal Thrust*" ou "*Main Siwalik Thrust*"). À l'arrière du MFT, les dépressions (les Duns) constituent des bassins transportés. Le dernier relief au Sud est parfois constitué par un anticlinal frontal, qui correspond à un pli de propagation sur un chevauchement aveugle. Le contact frontal est actuellement actif comme le montrent diverses observations : chevauchement sur le Quaternaire, nivellement, déformation de conduites forcées et de tunnels, sismicité de l'anticlinal de Mohand au Kumaon (NNE de Delhi), déformation des terrasses fluviales au Népal central.

### ***Le Moyen-Himalaya***

Le Moyen-Himalaya chevauche les Siwalik au niveau du "chevauchement bordier" (MBT "*Main Boundary Thrust*"), très rarement observable directement. Ce contact est localement repris en faille normale récente, recoupant des terrasses. Ce front chevauchant a dû être actif depuis 10 à 12 Ma, jusqu'à environ 2 Ma, époque à laquelle la déformation s'est transférée sur des chevauchements plus méridionaux.

Le Moyen-Himalaya montre des séries essentiellement protérozoïques (2500 à 540 Ma), avec très localement des séquences plus récentes, presque toutes à faciès continental, sauf l'Eocène qui présente des intercalations marines. On ne connaît pas de substratum archéen en Himalaya, mais des zircons détritiques archéens (2930 Ma) ont été trouvés dans des séries datées entre 2200 et 2100 Ma au Pakistan.

Le Protérozoïque inférieur forme une très épaisse séquence détritique, dénommée selon les endroits Chail, Kuncha (au Népal), Hazara, Salkhala, Simla, et équivalente des groupes Aravalli et Delhi de l'Inde péninsulaire. Elle est constituée de turbidites greywackeuses, de quartzites et d'intercalations basiques (amphibolites), dont les roches basiques de la base datées autour de 2500 Ma. On y observe également deux niveaux de diamictites (tillites) d'origine glaciaire (vers 2000-1800 et 1750-1650 Ma). Ces faciès sont traversés par des granites datés entre 1900 et 1780 Ma, dont les "gneiss d'Ulleri" à 1850 Ma.

Le Protérozoïque moyen comporte une succession de quartzites à ripple marks et fentes de dessiccation, et de puissantes séquences dolomiques et de calcaires à stromatolites, renfermant des poches de magnésite; l'ensemble caractérise un environnement de plate-forme.

Le Protérozoïque supérieur est constitué par un nouvel ensemble détritico-carbonaté à stromatolites (Krol), caractérisé par la présence de deux niveaux de schistes agglomératiques (Blaini boulder beds) d'origine glaciaire (vers 850 et 630 Ma), et passant au Paléozoïque basal, marqué par des niveaux de pélites à nodules phosphatés (Tal), datés par des fossiles et par Re/Os sur schistes noirs ( $554 \pm 16$ ,  $552 \pm 22$  Ma). Ces deux ensembles sont recoupés par des granites datés vers 850-825 et entre 520 et 470 Ma, montrant que cette région a été affectée par les événements panafricains, au contraire des régions situées plus au Sud dans le bouclier indien.

Dans les unités les plus proches du chevauchement bordier (MBT), le Protérozoïque supérieur est surmonté par des tillites (Talchir Boulder beds) et des séquences détritiques charbonneuses du Paléozoïque supérieur-Mésozoïque inférieur (séries de Gondwana, qui enregistrent la glaciation gondwaniennne permo-carbonifère).

Le Paléocène-Eocène (Subathu) repose, en discordance de ravinement, sur les formations précédentes. Il est constitué par des argiles et pélites noires, à interlits charbonneux, et puissantes intercalations de calcaires à foraminifères. Il s'agit des seuls niveaux franchement marins phanérozoïques du Moyen-Himalaya. L'ambiance de dépôt est celle d'un bassin côtier. Ce bassin est contemporain de la collision entre le bloc indien et la marge tibétaine ; il se situait donc en position de bassin flexural au front de la chaîne de collision en construction. L'alimentation détritique montre la présence de matériel ophiolitique remanié, provenant du Nord de la Haute Chaîne.

La série se poursuit par la formation de Murree, datée entre 30 et 20 Ma (âge Ar/Ar des plus jeunes micas remaniés), séquence continentale constituée de grès et pélites généralement rouges. Les paléo courants indiquent une double alimentation par le continent indien au Sud, et par un relief situé au Nord ; la présence de micas remaniés d'âges jeunes, implique l'érosion de reliefs situés dans la chaîne himalayenne.

Le Moyen-Himalaya est structuré en un empilement de nappes. Dans la majeure partie de l'Himalaya central, on distingue :

Les unités inférieures (parfois appelées "parautochtone"), juste au Nord du MBT, et aussi en fenêtre très au Nord de celui-ci. Elles montrent essentiellement des séquences du Protérozoïque moyen et supérieur et du Cénozoïque. Le métamorphisme est faible, les structures sédimentaires (stromatolites, ripple marks) sont en général bien conservées.

Les nappes médianes sont séparées des nappes inférieures par un chevauchement régional, le chevauchement de Ramgarh. Elles sont constituées de Protérozoïque moyen, intensément déformé et métamorphisé dans le faciès schiste vert.

Les nappes supérieures sont séparées des nappes inférieures et moyennes par le chevauchement de Munsiri (ou Almora, Chail, Jutogh...). Elles sont constituées de Protérozoïque et Paléozoïque inférieur intensément déformés, avec une forte fabrique tectonique.

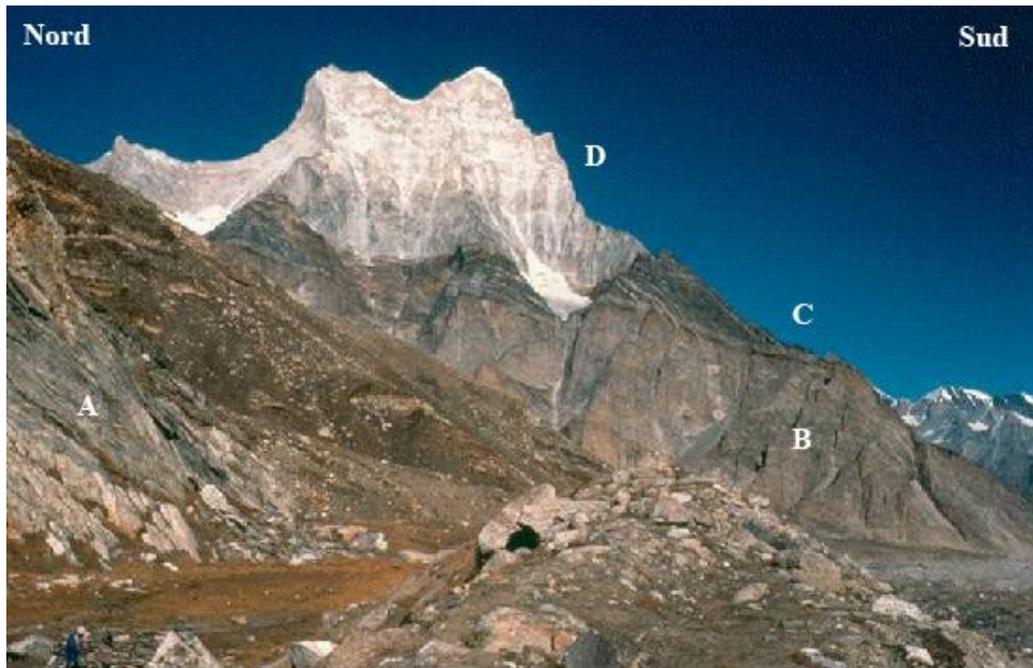
Dans toutes ces nappes, la structure principale est caractérisée par une schistosité régionale qui montre globalement un faible pendage nord, par une linéation d'étirement plus ou moins marquée, sub-perpendiculaire à la chaîne, et par des cisaillements haut vers le Sud. L'ensemble de la pile est affecté par une série de plis à grand rayon de courbure, parallèles à l'allongement de la chaîne ; ils permettent la réapparition en fenêtres des nappes inférieures au niveau des antiformes (fenêtres de Kishtwar, fenêtre de Kulu-Rampur, que nous recouperons), et la conservation de klippen du Haut-Himalaya dans les synformes ("synclinaux" du Mahabharat, d'Almora...).

### ***Le Haut-Himalaya cristallin***

Le Haut-Himalaya chevauche les unités précédentes au niveau du "chevauchement central" (MCT, "*Main Central Thrust*"), continu tout au long de la chaîne. Le MCT correspond en fait à une zone relativement épaisse (souvent plus d'un km) de matériel intensément cisailé, le MCT proprement dit correspondant à la zone de cisaillement maximal.

Le Haut-Himalaya cristallin est bien défini surtout en Himalaya central et oriental. Il correspond alors à une "dalle" (la "Dalle du Tibet") pouvant dépasser 15 km d'épaisseur, à pendage d'environ 40° vers le Nord. Ce sont des gneiss du faciès amphibolite à granulite (0,8 à 1,5 GPa, 650-800°C). On peut y distinguer :

- des alternances de gneiss très quartzeux et de gneiss micacés (épaisseur de 2 à 10 km), riches en silicates d'alumine (disthène et/ou sillimanite). Le protolithe est constitué d'alternances greywackeuses et pélitiques, analogue au Protérozoïque inférieur du Moyen-Himalaya.
  - des gneiss calciques, avec bandes de cipolins et de quartzites (paragenèses à quartz, biotite, feldpaths potassiques, oligoclase, pyroxène, hornblende verte ± scapolite ± épidote ± calcite ± dolomite). Cet ensemble évoque le Protérozoïque moyen et supérieur du Moyen-Himalaya.
  - des gneiss ocellés dont l'épaisseur atteint 300 m. On peut corréler ce faciès avec les granites cambro-ordoviciens du Moyen-Himalaya supérieur et des dômes cristallins internes situés plus au Nord.
- Au haut de cet ensemble, on trouve souvent des leucogranites (granites du haut Himalaya), datés entre 22 et 12 Ma, formant des laccolithes discontinus plurikilométriques (fig. 1-7).



**Figure 1-7** - Himalaya du Garhwal (Inde). Le Shivling (6543m). Hauteur du versant : environ 2000m. De bas en haut: (A), au premier plan : migmatites du CHH, (B) orthogneiss du sommet du CHH (ancien granite Cambro-Ordovicien), (C) filons de leucogranites Miocène basculés par le Détachement Nord Himalayen (cisaillement "haut vers le Nord"), (D) leucogranite (daté 21 Ma) en laccolithe dans les schistes sombres du Paléozoïque. Le pendage vers le SE est dû aux plis tardifs de grande amplitude.

### *Le Haut-Himalaya sédimentaire (Téthys Himalaya)*

Au-dessus du Cristallin du Haut Himalaya vient une séquence sédimentaire, plus ou moins complète, du Protérozoïque supérieur à l'Eocène moyen, atteignant 10 km d'épaisseur, dénommée "Téthys Himalaya". Elle forme certains des plus hauts sommets (calcaires ordoviciens au sommet de l'Everest et des Annapurna). Elle présente à sa base une zone de cisaillements (isogrades très resserrés) à pendage Nord, avec un jeu de type faille normale. C'est la "Faille Nord-Himalayenne" (FNH), ou "détachement nord-himalayen", ou encore "South Tibetan Detachment System" (STDS).

Le Paléozoïque du Haut-Himlaya peut être subdivisé en plusieurs ensembles :

- L'ensemble basal (Haimanta, Martoli, Phe, ...), épaisse séquence pélito-quartzitique couronnée par des niveaux calcaires et dolomitiques, représente le Protérozoïque terminal et le Cambrien. Au Pakistan, ces séries sont recoupées par des granites porphyroïdes datés entre 520 et 470 Ma.
- Le deuxième ensemble paléozoïque repose en discordance régionale sur le précédent. Il débute par un conglomérat, se poursuit par des quartzites ordoviciens, un Silurien carbonaté, des quartzites du Dévonien (Muth), un Carbonifère inférieur grésocalcaire à niveaux de gypses (Lipak), un Carbonifère supérieur, caractérisé par des schistes noirs à fenestelles, suivi de tillites. Tout cet ensemble caractérise un environnement de plate-forme, avec de fréquentes intercalations fluviales, voire éoliennes au cours du Dévonien.
- Le troisième ensemble est à son tour discordant sur le précédent. Au Cachemire, il débute par les trapps basaltiques du Panjal, qui peuvent atteindre 2000 m d'épaisseur ; ils sont suivis par des shales noirs (Productus shales) du Permien terminal, qui constituent un niveau de décollement majeur.

Le Trias est caractérisé par des alternances de séquences carbonatées fossilifères et de marnes, parfois gréseuses, déposées dans un environnement de plate-forme subsidente. Le Rhétien et le Lias sont représentés par une puissante plate-forme carbonatée (calcaires de Kioto au Ladakh, de Jomossom au Népal), qui devient détritivée au Dogger. La série se poursuit par les "schistes de Spiti"

du Callovien-Valanginien, schistes bitumineux contenant d'abondants nodules à fossiles pyriteux (ammonites, phragmocônes de bélemnites). Ces dépôts caractérisent une plate-forme très mal ventilée, en relation avec l'isolement qu'a connu le bloc indo-malgache à la suite de l'ouverture du canal de Mozambique. Ces schistes sont surmontés par des séries gréseuses et quartzitiques, intercalées de paléosols à mangrove et de niveaux de tempestites, du Crétacé inférieur.

Le Crétacé supérieur est variable selon les unités structurales. Dans les plus basses (à Spiti), il est constitué par des calcaires à faciès de plate-forme (Chikkim) et calcschistes gris. Dans les plus hautes (au Zaskar), il montre des calcschistes varicolores à foraminifères pélagiques (Fatula). Le Maastrichtien-Eocène n'est conservé qu'en trois endroits : au Zaskar, au Nord de l'Everest (Tingri) et au Nord du Sikkim. Il s'agit encore de dépôts de plate-forme, détritiques puis carbonatés. Le sommet de la série montre des séquences tantôt continentales, tantôt marines dans la nappe supérieure. Les derniers niveaux marins caractérisent l'Eocène moyen.



**Figure 1-8** - Zaskar, haute vallée de la Suru, plaine de Zulidok. Au fond à droite, le Cristallin du Haut Himalaya, limité dans la vallée par la Faille Nord Himalayenne. Au premier plan à gauche, au dessus du Paléozoïque supérieur, les séries calcaires du Trias et du Jurassique inférieur (Kioto), surmontant les shales noirs et les laves sombres du Permien (Panjal traps)

Ces séries sédimentaires du Téthys Himalaya sont plissées et écaillées en une série de nappes, décollées à plusieurs niveaux : schistes du Permien, alternances marno-calcaires du Trias moyen, schistes de Spiti, base du Maastrichtien. Les plis et les chevauchements sont à déversements S ou N ; ils montrent des structures replissées et des schistosités superposées qui caractérisent une déformation polyphasée d'âge postérieur à l'Eocène moyen.

### *Les séquences pélagiques (Bassin de Lamayuru)*

À proximité de la zone de suture, existe une séquence permo-mésozoïque pélagique. Elle constitue une nappe charriée (nappe de Lamayuru). La série, qui va du Trias au Crétacé supérieur, est constituée par un ensemble flyschöïde monotone de schistes pélitiques à minces lits de quartzites et de brèches, localement intercalés de calcschistes et de sills de matériel volcanique alcalin. Le substratum de cet ensemble est inconnu (séries du dôme de Tso Morari ?).

La déformation de la série est caractérisée par des plis isoclinaux synschisteux de deux générations à déversement Sud, puis par des rétrocharriages à déversement Nord. Un métamorphisme de bas degré (faciès zéolithes à faciès schistes verts) est associé à la première déformation.

### ***Signification des séquences du Téthys Himalaya***

*L'ensemble inférieur (Protérozoïque sup.-Cambrien), traversé par les granites panafricains, représente vraisemblablement un domaine qui a subi le contrecoup de l'effondrement de la chaîne panafricaine. Des structures de cet âge ne sont observées que dans la chaîne himalayenne, le bouclier indien en étant exempt.*

*Le Paléozoïque discordant du deuxième ensemble représente le remplissage de bassins cratoniques, installés sur une croûte continentale soumise à une subsidence modérée. Il ne s'agit nullement de séquences caractérisant une "marge téthysienne nord-indienne" : la marge "sud-téthysienne" du Paléozoïque inférieur se trouvait alors en effet très au Nord du bloc indien, au niveau du Kun Lun actuel.*

*C'est le troisième ensemble (Permien supérieur à Eocène) qui enregistre l'évolution de la marge Nord-indienne, ou Sud-téthysienne. Les nappes du Haut-Himalaya représentent la plate-forme Nord-indienne, et les séries flychoïdes de l'unité de Lamayuru le talus et le pied de marge.*

### ***Les massifs cristallins internes (NHC, "North Himalaya Crystalline")***

Au Nord du Haut-Himalaya existe une série de dômes métamorphiques, dans diverses situations structurales :

- Toute une série de dômes situés entre les longitudes 85° et 90° E (Malashan, Lagoi Kangri, Mabja, Kampa, Kangmar), au Nord d'une zone de chevauchement entraînant un redoublement de la série sédimentaire. Les dômes percent l'empilement des unités du Téthys Himalaya et leur toit est cisailé haut vers le Nord. Des massifs de granites à deux micas, datés entre 15 et 11 Ma, apparaissent parfois au cœur de ces dômes.
- Le dôme de Tso Morari, situé à proximité de la suture de l'Indus, formé de terrains ayant subi un métamorphisme de très haute pression à 55-53 Ma. Tout comme les éclogites de Kaghan, situées au Sud-Ouest du Nanga Parbat et les éclogites de Stak à l'Est du Nanga Parbat, il indique que certaines portions de la marge indienne ont été subduites à une très grande profondeur (80 à 100 km) entre la fin du Paléocène et le début de l'Eocène, puis qu'une exhumation très rapide les a amenées proches de la surface dès la fin de l'Eocène.
- Le dôme de Gurla Mandata (7728 m), aux sources de la Sutlej, à la terminaison sud-est de la faille de Karakorum-Nubra. Il représente une extrusion du HHC mise en place il y a 9 Ma à travers l'ensemble déformé du Téthys Himalaya, détaché au dessus du dôme. Un bassin sédimentaire continental est installé au-dessus du détachement. Cette structure serait un phénomène local, lié au jeu coulissant dextre de la faille de Karakorum-Nubra.

### ***Les dômes des syntaxes (Namche Barwa, Nanga Parbat)***

Les syntaxes, situées aux deux extrémités de la Haute Chaîne, sont marquées par de très hauts sommets (Nanga Parbat, 8125 m, à l'Ouest, au Pakistan, et Namcha Barwa, 7762 m, à l'Est, en Chine et en Inde), au cœur de 2 antiformes perpendiculaire à la direction de la chaîne. Ces antiformes transverses d'échelle crustale sont constituées par l'empilement des nappes métamorphiques du Moyen-Pays et du HHC. Au cœur apparaissent des roches métamorphiques "profondes" (granulites, 1,3 GPa pour 700-750°C au Namche Barwa), dont le protolithe est protérozoïque, mais dont le métamorphisme, d'âge éocène daté entre 40 et 36 Ma, se rapporte à l'épisode métamorphique éo-himalayen. La formation progressive de ces grands antiformes débute au Miocène moyen (vers 20 Ma) et conduit à l'exhumation très rapide (1 cm/an) de roches profondes et chaudes. Cette exhumation est responsable de la fusion partielle (par décompression isotherme) des gneiss et de la formation de

granites d'anatexie entre 10 et 1 Ma. Elle serait entretenue (facilitée ?) par l'érosion très forte de l'Indus (pour le Nanga Parbat) et du Bramapoute (pour le Namche Barwa).

### **La zone de suture Indus-TsangPo.**

La zone de suture marquée morphologiquement par une dépression, suivie par le cours supérieur de l'Indus à l'Ouest, et du TsangPo à l'Est. Elle correspond à un domaine très complexe, souvent qualifié de "mélange", terme qui peut selon les endroits désigner un ensemble sédimentaire (flysch à blocs, wildflysch), une zone de mylonite à matériel serpentiniteux, ou une imbrication serrée d'écailles tectoniques. Dans deux régions (Spongtang au Ladakh et Amlang La au Kumaon), des roches de la suture forment d'importantes klippes au-dessus des séries du Téthys Himalaya.

#### ***Les flyschs à blocs***

Les unités structurellement les plus basses de ce complexe sont constituées par un flysch à blocs d'âge Maastrichtien-Paléocène, atteignant localement l'Eocène inférieur au Ladakh (Spongtang) et au Tibet. Les blocs remaniés (olistolites), incluent des calcaires à faciès de plate-forme du Permien supérieur, des calcaires pélagiques du Trias inférieur, des amas de serpentinites, des calcschistes pélagiques du Crétacé supérieur, des blocs de laves basaltiques (chimisme d'OIB). Au Ladakh, on observe que, hormis les serpentines, ces faciès constituent une même séquence stratigraphique. Ces blocs sont interprétés comme d'anciens reliefs intra-océaniques, mis en place au Permien, et incorporés tectoniquement au flysch maastrichtien-éocène.

#### ***Les schistes bleus***

Des schistes bleus à glaucophane-lawsonite apparaissent en écailles en trois endroits : au Pakistan (Swat), dans l'Ouest du Ladakh (Shergol, à l'Ouest de Lamayuru) et dans l'Est du Ladakh (Sumdo, au Nord du Tso Morari). Au Ladakh, ils sont datés à 98 Ma (Ar/Ar sur différents minéraux et roche totale), et ont été formés à des pressions de l'ordre de 0,9 à 1 GPa, et à des températures de 350 à 450°C. Les protolithes sont un mélange de faciès d'arc intra-océanique, de MORB et d'OIB.

#### ***Les radiolarites***

Des radiolarites (ancienne couverture sédimentaire océanique), parfois associées à des laves basiques et à des hyaloclastites, forment tantôt des écailles très discontinues (Ladakh), tantôt une zone assez continue, constituée d'un empilement serré d'écailles minces (Tibet, où elles sont datées par radiolaires et conodontes du Trias supérieur à l'Aptien).

#### ***Les ophiolites***

Tout au long de la suture, les ophiolites sont le plus souvent réduites à une lame de serpentinite. Cependant, outre les klippes ophiolitiques de Spongtang et d'Amlang La, il existe quelques zones où une séquence ophiolitique plus ou moins complète est observable (ophiolites de Xigaze et de Luobusa au Tibet, ophiolite de Nidar au Ladakh).

L'ophiolite de Luobusa est particulière : elle comprend des boudins métriques de chromitites associées à des dunités dans la séquence harzburgitique; ces boudins contiennent des minéraux d'ultra-haute pression (diamant, coésite) indiquant que ces roches ont cristallisé à des pressions minimales de 3 à 4 GPa. La forme particulière des coésites en baguette suggère la présence initiale de stishovite qui impliquerait des pressions de cristallisation encore plus importante, supérieure à 9 GPa, i.e. environ 300 km de profondeur.

#### ***Les conglomérats d'épisuture***

Des conglomérats continentaux connus au Ladakh et au Tibet reposent en discordance sur toutes les séries de la suture. Leur âge est mal contraint (pollens d'âge oligocène au Tibet). La puissante formation conglomératique du Mont Kailas, discordante sur le batholite du Gangdese, est parfois corrélée avec cette séquence. Elle contient des intercalations de tufs adakitiques qui ont fourni

des âges Ar/Ar sur différents minéraux entre  $17,4 \pm 0,7$  et  $24,1 \pm 0,7$  Ma (Oligocène terminal à Miocène inférieur).

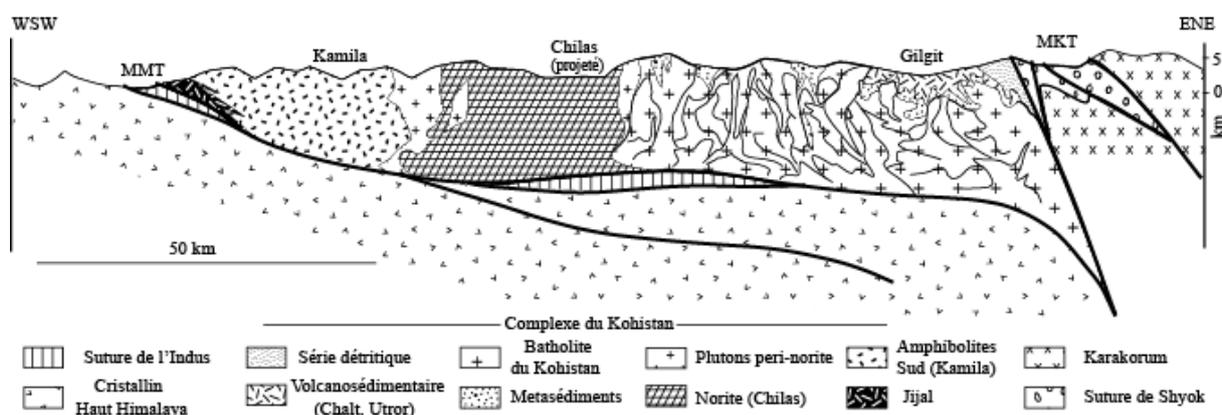
### Les séries d'arc du Kohistan et de Dras

À l'Ouest de la chaîne (Kohistan, au Pakistan, et Ladakh, à cheval sur Pakistan et Inde), la suture est dédoublée. Il apparaît un très puissant ensemble magmatique et volcanique basique, d'affinité tholéitique, et de flyschs greywackeux : l'arc Kohistan-Ladakh, de part et d'autre du promontoire du Nanga Parbat.

#### L'arc du Kohistan

Il constitue une unité tectonique chevauchant les séries de la plaque indienne avec une flèche de plus de 200 km. La surface de chevauchement, qui correspond à la zone de suture de l'Indus, est connue sous le nom de "Main Mantle Thrust" (MMT). Une zone discontinue d'écaillés très déformées, incluant les schistes bleus de Swat, existe le long du MMT. Au Nord, le Kohistan est chevauché par le Karakorum, par l'intermédiaire de la zone de suture de Shyok, ou "Main Karakorum Thrust" (MKT).

L'arc du Kohistan montre du Sud au Nord une section complète d'un arc, depuis les racines mantelliques jusqu'aux séries volcano-sédimentaires supérieures :



**Figure 1-9** - Coupe de l'arc du Kohistan. D'après Burg *et al.*, 2006. MMT : « Main Mantle Thrust » (suture de l'Indus); MKT : Chevauchement du Karakorum (suture de Shyok).

- à la base de la séquence le complexe de Jijal, épais de plus de 7 km, comporte une séquence mantellique (péridotites, pyroxénites, pyroxénites à grenats), surmontée par une séquence mafique de gabbros à grenat qui ont cristallisé dans les conditions du faciès granulitique. Une isochrone Sm/Nd à  $117 \pm 7$  Ma a été obtenue sur les ultrabasites.

- au-dessus, une séquence crustale très épaisse, constituée de meta-gabbros intercalés de laves en coussins et de formations volcano-sédimentaires, à caractère OIB et calco-alcalin, métamorphisés dans le faciès amphibolites. Les amphibolites sont recoupées au Nord, par un volumineux ensemble de gabbro-norite à caractère calco-alcalin, datées à  $84 \pm 0,5$  Ma (U/Pb sur zircon): le complexe de Chilas, long de près de 300 km et large de 5,.

- plus au Nord, le batholite du Kohistan (cf infra : le pluton trans-himalayen), constitué de toute une série de plutons, intrusifs dans un ensemble volcano-sédimentaire déformé et subdivisé en deux épisodes : un premier, boninitique (avec localement des sédiments moins transformés Jurassique et Crétacé, à débris de polypiers et à Orbitolines); un second d'âge paléocènes (Ar/Ar sur hornblende, interstratification de calcaires à Nummulites), fait de laves en coussins tholéitiques à l'Est, et d'une série calco-alcaline (andésites basaltiques à rhyolites) à l'Ouest et au centre du Kohistan. Les volcanites affleurent au sommet du Rakaposhi (7888 m), qui constitue le morceau d'arc le plus haut du

monde. Les plutons tonalitiques et grano-dioritiques ont été datés à 102 Ma, entre 84 et 66 Ma, et entre 59 et 54 Ma. Des âges plus jeunes, entre 48 et 10 Ma, correspondent à des granites de collision.

- au contact avec la suture, une formation détritique molassique continentale mal datée remaniant les séries du Kohistan et du Karakorum.

Cet arc illustre donc une histoire complexe et de longue durée qui comporte plusieurs étapes : naissance en contexte intra-océanique vers 117 Ma (Aptien), édification en tant qu'arc intra-océanique entre 117 et 95 Ma, délamination de la croûte inférieure de l'arc entre 95 et 90 Ma, (contemporaine de sa collision avec la marge Nord ?), édification d'un nouvel arc calco-alcalin entre 84 et 54 Ma, enfin cisaillement et obduction sur la lithosphère indienne.

### *L'arc de Dras*

Il se développe à l'Est du Nanga Parbat, dans la région de Karghil. Il montre à sa base un ensemble de tectonites harzburgitiques serpentinisées et de cumulats mafiques et ultramafiques. Au-dessus, vient une formation volcano-sédimentaire hétérogène composée de coulées de laves porphyriques, de tufs, et de pélites sombres, métamorphisée sous faciès schistes verts et amphibolite. Des intercalations de marbres ont fourni une ammonite de l'Albien et des orbitolines de l'Aptien supérieur. Les séries de l'arc de Dras, déformées et collées à la marge nord dès le Crétacé, sont chevauchées par les séquences de la marge indienne, retro-chevauchantes vers le Nord. On retrouve ici quelques-unes des caractéristiques du Kohistan (mise en place intra-océanique à l'Aptien, accostage à la marge nord vers 100 Ma, mise en place de gabbro-norite), mais l'importance des retro-chevauchements masque l'obduction sur la marge indienne.

## **La marge asiatique.**

Au Nord de la suture, la marge asiatique constitue une chaîne élevée continue, jalonnée par une série de sommets dépassant 6000 m, le Transhimalaya. À l'Est de la faille de Karakorum-Nubra, la chaîne du Gangdese constitue la marge Sud du Tibet (bloc de Lhasa). À l'Ouest, la suture est dédoublée et deux chaînes parallèles se développent : la chaîne du Ladakh, prolongement du Kohistan, et celle du Karakorum, séparées par la suture de Shyok.

### *L'arc volcano-plutonique transhimalayen : Ladakh, Gangdese*

La chaîne transhimalayenne représente une ancienne chaîne de subduction située à proximité ou directement sur la marge sud-asiatique, résultat de la subduction de l'océan téthysien avant la collision. Des formations magmatiques et volcaniques, à tendances calco-alcalines, et datées du Crétacé supérieur à l'Eocène-Oligocène, constituent une ceinture continue au Nord de la suture. À l'Est de la faille de Karakorum-Nubra, il s'agit du batholite du Gangdese, à l'Ouest, de celui du Ladakh et de celui du Karakorum. Ce magmatisme a été mis en place d'une part sur la marge d'un domaine continental, le bloc de Lhasa (S Tibet), et d'autre part au sein de l'arc Ladakh-Kohistan.

Le batholite du Ladakh forme une bande de 500 km de long sur 25 km de large ; il se prolonge par celui du Kohistan (350 km) au-delà du promontoire de Nanga Parbat. Il est intrusif dans les séries d'arc (Dras, Kohistan). Trois épisodes majeurs de mise en place sont distingués: entre 102 et 70 Ma des gabbros, gabbro-norites, diorites, granodiorites; entre 70 et 50 Ma, aussi des gabbros, diorites, granodiorites, granites. Ces roches présentent toutes des caractéristiques géochimiques calco-alcalines. Enfin, entre 45 et 25 Ma, des plutons leucogranitiques (à béryl) et des filons aplo-pegmatitiques. Les volcanites associées au pluton constituent une épaisse succession de basaltes andésitiques, andésites, trachyandésites et ignimbrites calco-alcalines, ayant fourni des âges entre 67 et 40 Ma.

### *Les flyschs*

*Le flysch de Xigaze* affleure tout au long de la suture au Tibet. L'essentiel de cette puissante formation est constitué par un empilement de turbidites volcani-clastiques et de debris-flows mis en place dans un environnement de cône sous-marin profond, avec trois séquences majeures progradantes en direction du Sud. La séquence inférieure débute à l'Aptien supérieur-Albien inférieur. Le sommet de la seconde méga-séquence est daté du Turonien (Ammonites).

*Le flysch de Nindam*, reconnu au Ladakh est aussi interprété comme le remplissage d'un bassin d'avant-arc. Il montre une série flyschöide détritique et volcano-détritique épaisse de plusieurs milliers de mètres, constituée pour l'essentiel par un empilement de turbidites pélito-greywackeuses, intercalées de lits de debris-flow et grain flows. Les fossiles et microfossiles caractérisent le Cénomano-Turonien, le Campanien, le Maastrichtien. La série atteint peut-être le Paléocène.

### ***Les séries détritiques de l'Indus***

Au Ladakh, le flysch de Nindam chevauche au Nord une ceinture de formations détritiques, nommées molasses ou flyschs de l'Indus, que l'on peut subdiviser en trois grands ensembles

- Au Sud du bassin, un ensemble turbiditique marin qui repose sur des formations volcaniques et volcano-clastiques. Il débute à l'Albien; au Maastrichtien-Paléocène apparaissent des "debris flows", qui remanient essentiellement des volcanites et granitoïdes du Ladakh, mais aussi des spinelles ophiolitiques. À l'Eocène inférieur, les faciès à Nummulites sont de faible profondeur ; ils passent à l'Eocène moyen à des environnements saumâtres. Il s'agit des derniers faciès marins de la suture.

- Au centre, en discordance sur la série précédente, une très épaisse série molassique, constituée par un ensemble fluvial rouge à niveaux de paléosols, surmonté par des séquences de delta lacustres. Cette série molassique remanie le batholite et les volcanites de l'arc du Ladakh. Mal datée, elle contient des végétaux rapportés à l'Oligocène dans la région d'Hemis (Est Ladakh) et des mammifères du Miocène inférieur dans la région de Karghil,

- Au Nord du bassin, une série entièrement continentale, qui repose en discordance sur le batholite du Ladakh. Cette série grés-conglomératique a longtemps été considérée comme mio-pliocène, mais des intercalations lacustres de la base ont fourni de rares ostracodes du Crétacé terminal. Cet ensemble est surmonté par une épaisse série turbiditique lacustre non datée (attribuée au Paléocène-Eocène inférieur), puis par la même série molassique continentale, discordante sur les séries méridionales.

L'ensemble est intensément déformé par des plis isoclinaux synschisteux déversés au Sud, repris par des plis également synschisteux, et des chevauchements, à déversement Nord. Dans les séries du Sud, un léger métamorphisme, contemporain des plis déversés vers le Nord, a été daté autour de 30 Ma (âges K/Ar sur illites).

### ***La suture nord : suture de Shyok***

A l'Ouest de la faille de Karakorum-Nubra, la suture est dédoublée. La suture de Shyok (ou MKT, Main Karakorum Thrust), située au Nord du batholite Ladakh-Kohistan, sépare ce dernier de la chaîne du Karakorum.

On y distingue trois grands ensembles:

- Une épaisse séquence volcanique et volcano-clastique (Shyok, Pakora) de faciès schistes verts. Les laves sont des andésites basaltiques et des andésites à caractéristiques géochimiques d'arrière-arc. Des intercalations calcaires (olistolites et turbidites calcaires) et radiolaritiques ont fourni de rares faunes du Crétacé supérieur. Cet ensemble constitue une série d'écaillés chevauchant l'arc du Ladakh. Dans l'Est du Ladakh, à proximité de la faille de Karakorum-Nubra, ces séries sont rétro-chevauchées par l'arc du Ladakh.

- Une unité chaotique (mélange), de péridotites serpentinisées, incluant des blocs de basaltes de type N-MORB, de radiolarites et de calcaires à faciès de plate-forme (Permien).

- Une molasse continentale discordante, remaniant essentiellement les faciès précédents, et qui est prise dans des contacts tectoniques. Son âge est mal contraint, post-éocène moyen.

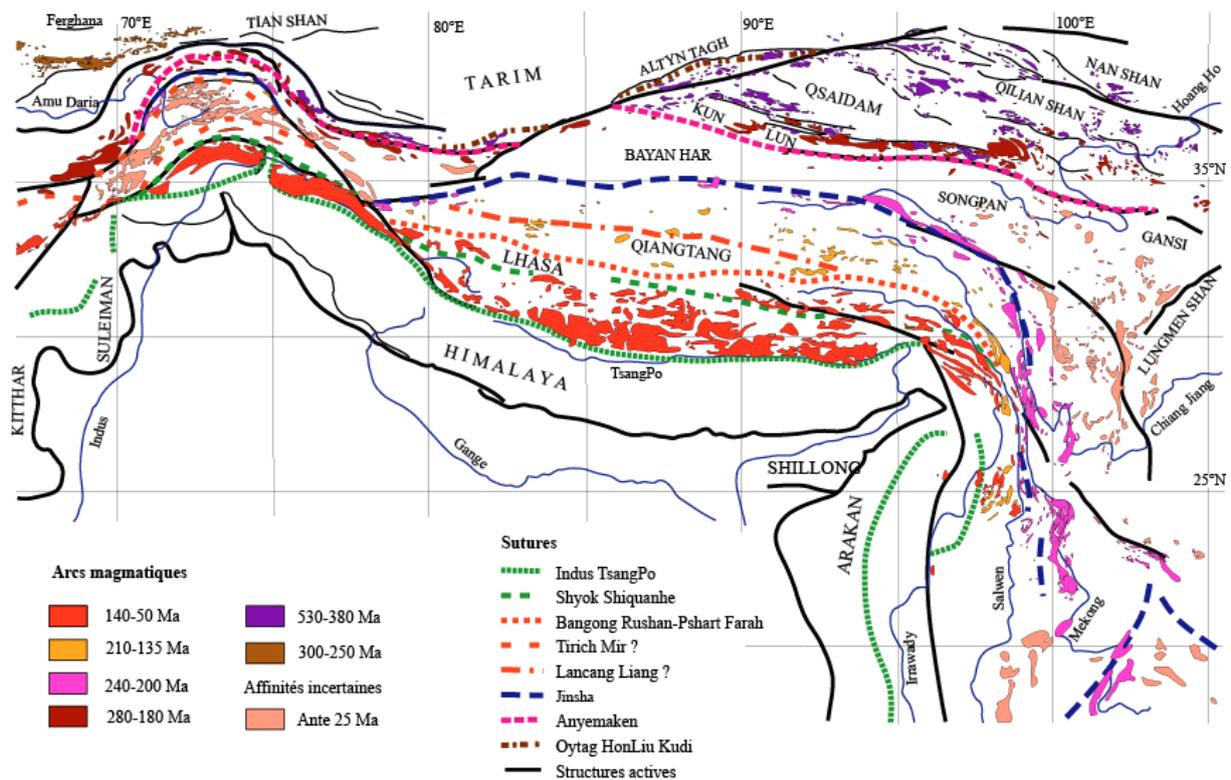
Cette zone représente un espace océanique d'arrière-arc, qui a fonctionné au Crétacé supérieur et, peut-être, jusqu'à l'Eocène inférieur. Ceci paraît contradictoire avec le fait que l'arc Ladakh-Kohistan a été collé à la marge asiatique au début du Crétacé supérieur (100 Ma). Il faut donc envisager qu'un bassin d'arrière-arc ait pu s'ouvrir à l'emplacement de la suture entre l'arc et la marge asiatique. La suture de Shyok serait donc une suture double.

## Le Tibet et le Karakorum

La chaîne himalayenne passe, au Nord, à un domaine de hautes terres. À l'Est de la faille de Karakorum-Nubra, il s'agit du Tibet (non détaillé ici), et à l'Ouest des chaînes du Karakorum, de l'Hindu-Kush et du Pamir.

### Le Tibet

Le Tibet est un vaste plateau, d'altitude moyenne proche de 5000 m, interrompu par des chaînes plus élevées (Tanggula, Kun Lun). Le Tibet est remarquable par l'épaisseur de la croûte continentale qui le supporte, proche de 70 km en moyenne, localement près de 90 km dans l'Ouest du Tibet, soit le double de la normale, ce qui a été interprété (Argand, 1924) comme indiquant que la croûte continentale indienne s'était engagée sous celle de l'Asie jusqu'à la limite Nord du plateau.

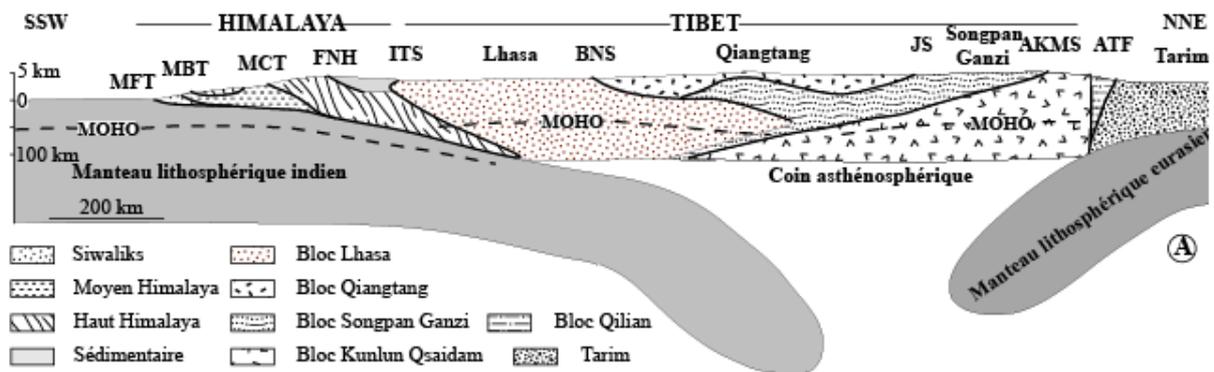


**Figure 1-10** - Carte schématique du Tibet (compilation Valli, in G. Mascle et al.). Les arcs magmatiques marquent les accrétions successives du Paléozoïque à l'Eocène. On a distingué le magmatisme ante-oligocène dont les affinités, subduction et/ou collision, ne sont pas encore établies clairement. Les sutures ont souvent été reprises, y compris récemment : suture et faille Kun Lun ; suture Oyttag et chevauchement nord Pamir ; suture et faille Jinsha ; suture Shyok et MKT (chevauchement du Karakorum)... Les tracés des possibles sutures intra-blocs (Shiquanhe, Lancang Liang) sont figurés.

Les coupes construites à l'aide des profils géophysiques montrent que la croûte est effectivement redoublée sous le Sud-Tibet, sous le bloc de Lhasa jusqu'à la suture de Bangong-NuXiang. Plus au Nord, le Moho remonte, en particulier au niveau de la faille de l'Altyn Tagh à une profondeur de 50-60 km.

Le Tibet montre un volcanisme récent miocène à sub-actuel de nature potassique à ultra-potassique, et localement à caractère adakitique; les données géochimiques suggèrent la présence d'une croûte inférieure sous-jacente de type indien. Ceci est en bon accord avec les modèles qui proposent que la croûte inférieure indienne soit sous-plaquée sous le Tibet, voire redoublée par écaillages multiples. On aurait donc ainsi sous le Tibet un triplement de la croûte inférieure. Dans cette optique, la croûte inférieure indienne serait donc subduite sous le Tibet, la croûte supérieure indienne serait découpée et accumulée en écailles pour former le prisme himalayen.

Le plateau tibétain est, en fait, constitué par la juxtaposition de plusieurs microcontinents (Lhasa, Qiangtang, Songpan Ganzi-Bayan Har, Kun Lun, Qilian Shan-Nan Shan) qui sont successivement entrés en collision avec l'Asie depuis le Paléozoïque inférieur. Les structures, et en particulier les sutures jalonnées d'ophiolites, ont été réactivées en compression, impliquant un raccourcissement pendant la collision himalayenne.



**Figure 1-11** - Coupe à l'Ouest du Tibet (82-84°E) AKMS : suture Anyemaken-Kun Lun-Muztagh ; ATF : zone décro-chevauchante d'Altyn Tagh ; BNS : suture Bangong-NuXiang ; FNH : Faille (détachement) nord-himalayenne ; ITS : suture Indus-TsangPo ; JS : suture Jinsha ; KLF : faille du Kun Lun ; MBT : chevauchement bordier ; MFT : chevauchement frontal ; MCT : chevauchement central.

### *La faille du Karakorum*

Le plateau tibétain est recoupé dans sa partie sud-ouest sur près de 1000 km par la zone de faille ductile dextre du Karakorum-Nubra, orientée NW-SE. La présence de granites anté- syn- et post-tectoniques au sein de la zone faillée permet de contraindre son activité entre 25 Ma et 5 Ma, avec un décalage des sutures estimé à environ 200-250 km, soit une vitesse moyenne de déplacement de 1 cm/an.

### *Le Karakorum*

Le Karakorum est limité au Sud par la suture de Shyok ou MKT (Main Karakorum Thrust), et au Nord par une zone de failles (Tirich Mir, Wakhan, Kilik), qui correspond peut-être à une zone de

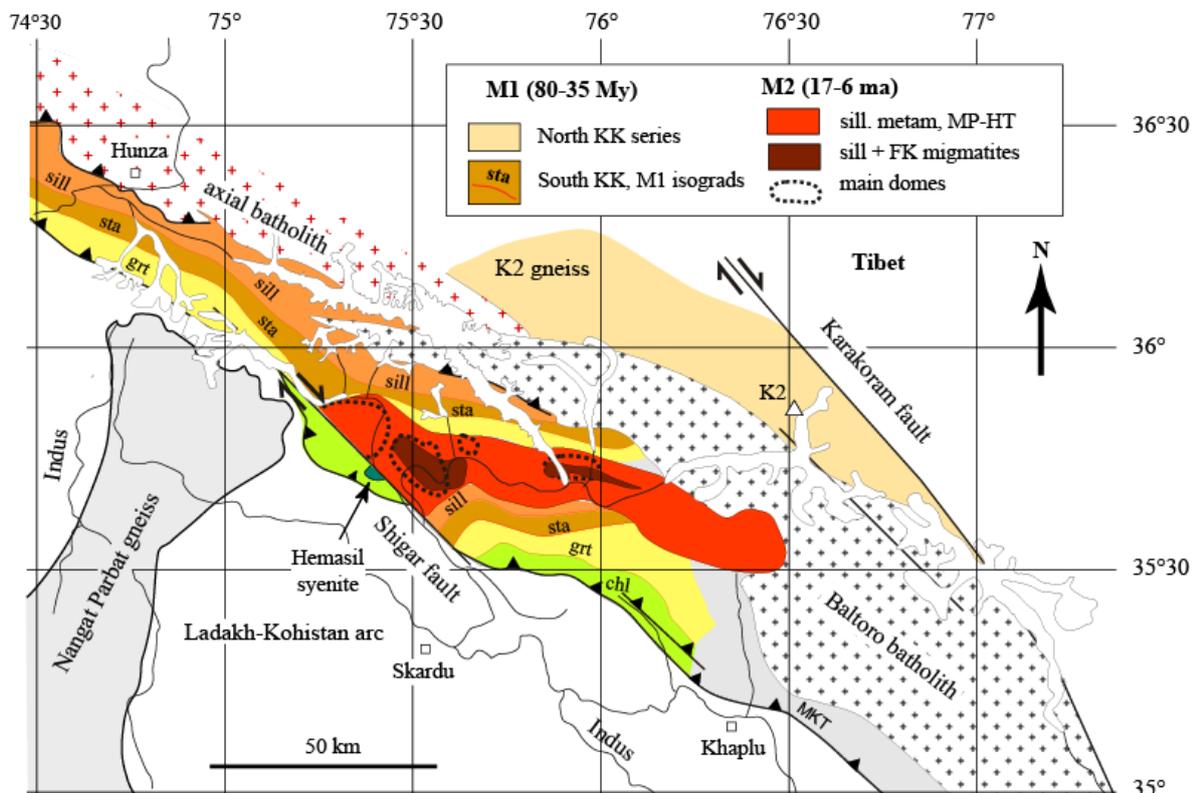
suture. Au Nord du Karakorum, l'unité de l'Hindu Kush-Sud Pamir s'étend jusqu'à la suture de Rushan-Pshart, bien caractérisée par des ophiolites jurassiques.

Le Karakorum comprend une ceinture métamorphique méridionale, un batholite axial, et une zone sédimentaire au Nord. Juste au Sud du Masherbrum (Sud Karakorum, au Sud de la zone des dômes, cf. infra), existent les traces d'une suture du Paléozoïque inférieur. L'ensemble chevauche le Kohistan et le Ladakh au niveau du MKT, qui reprend la suture de Shyok.

- La ceinture méridionale (substratum précambrien et faciès meta-sédimentaires de l'Ordovicien, du Permien, du Trias) est structurée en plis (nappes ?) déversés vers le SE, associés à un métamorphisme en plusieurs épisodes de 60 à 18-20 Ma. Un épisode tardif, postérieur à 18 Ma (âges de refroidissement entre 10 et 3 Ma), accompagne la formation d'une série de dômes orientés E-W, obliques au MKT.

- Le batholite axial, constitué pour l'essentiel par des granodiorites à tendance calco-alcalines d'âge crétacé-paléocène (80 à 40 Ma), tout à fait analogues à la ceinture magmatique du Gangdese tibétain. Cet ensemble est recoupé par des granitoïdes plus récents, tels le granite de Baltoro (21,5 Ma) ou le leucogranite de Sumayar (9,2 Ma), qui possèdent des caractéristiques de magmatisme de collision.

- La ceinture sédimentaire septentrionale, à substratum ante-ordovicien supportant une série de plate-forme clastique à intercalations carbonatées d'âge paléozoïque, remplacée par une véritable plate-forme carbonatée au Permien et au Trias. À partir du Jurassique, se met en place une série clastique remaniant des ophiolites et comportant, au Crétacé, des intercalations gypseuses d'une part et des calcaires à Orbitolines de l'autre. Tout cet ensemble est intensément déformé (plis et chevauchements) et recouvert en discordance par une série détritique continentale rouge, avec une dernière incursion marine au Campanien. L'évolution de ce domaine est assez analogue à celle du bloc de Lhasa.



**Figure 1-11** -Métamorphisme du Sud Karakorum. L'âge U-Th-Pb du granite du Baltoro s'étale entre 26.4 et 13 Ma. Reprise pendant l'Himalayen des anciennes structures et du métamorphisme associé à la subduction "andine"

## Annexe 1 - Cartes

### Cartes topographiques :

Les meilleures sont les cartes au 1/150 000 publiées en 2008 par les éditions Olizane à Genève. Mais elles ne descendent vers le Sud que jusqu'au niveau de Karza Gongma, au Nord du Parang La. Il existe une version en une seule feuille au 1:300 000.

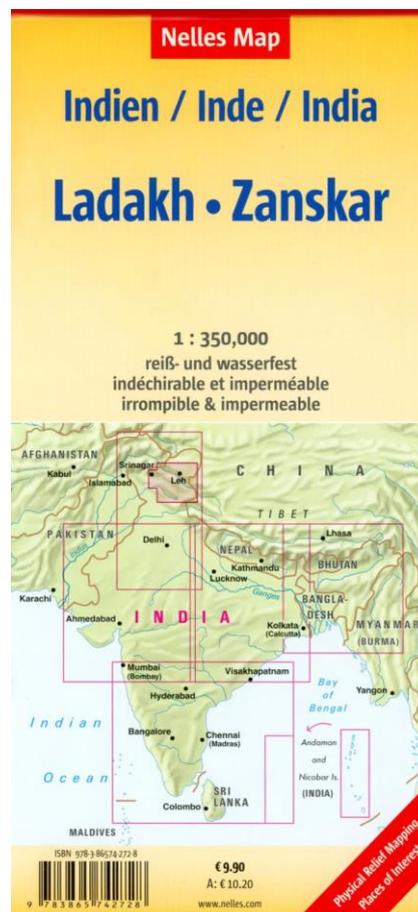
Nelles publie une très bonne carte au 1:1 500 000 du NW de l'Inde (édition 2016), qui permet de se repérer facilement dans l'orohydrographie complexe de l'Himalaya du Nord-Ouest. Nelles publie aussi une carte du Ladakh-Zanskar au 1: 350 000 (édition 2017). Très claire, elle descend plus au Sud que les cartes Olizane, presque jusqu'à la confluence Spiti-Sutlej. Nous vous suggérons beaucoup de vous la procurer.

**Cartes géologiques :** il y a beaucoup de cartes schématiques ou simples schémas géologiques dans la littérature. Aussi des cartes géologiques des zones où il y a eu des travaux de thèse, en particulier ceux de l'équipe de Lausanne. Une seule carte à la fois synthétique et détaillée, celle d'Albrecht Steck (cf. Steck, 2003)

India North 1:1 500 000. (2016) Nelles maps, Nelles Verlag, München

India Ladakh.Zanskar 1:350 000. (2017) Nelles maps, Nelles Verlag, München

Ladakh & Zanskar 1 : 150 000 (2008) 3 feuilles. Editions Olizane, Genève



**Annexe 2 - Références des articles ou thèses cités dans le livret-guide**

- Argand, E. (1924) - La tectonique de l'Asie. CR 13<sup>e</sup> Congr. Géol. Int. Bruxelles : 171-372
- Buchs, N. et Epard, J.L. (2018) - Nicolas Buchs & Jean-Luc Epard- (2018): Geology of the eastern part of the Tso Morari nappe, the Nidar Ophiolite and the surrounding tectonic units (NW Himalaya, India), Journal of Maps, DOI: 10.1080/17445647.2018.1541196
- Burg, J.P., Jagoutz, O., Dawood, H., Hussain, S.H. (2006) - Precollision tilt of crustal blocks in rifted island arcs : structural evidences from the Kohistan Arc. Tectonics, doi 10.1029/2005TC001835
- De Sigoyer, J., Chavagnac, V., Blichert Toft, J., Villa, I., Luais, B. et al. (2000) Dating the Indian continental subduction and collisional thickening in the northwest Himalaya: Multichronology of the Tso Morari eclogites, Geology, 28/66, 487-490.
- Epard, J.L., Steck, A., Vannay, J.C. et Hunziker, J. (1995) - Tertiary Himalayan structures and metamorphism in the Kulu valley (Mandi-Khoksar transect of the Western Himalaya) - Shikar Beh nappe and crystalline Nappe. Schweiz. Mineral. Petrogr. Mitt., 75, p. 59-84
- Epard, J.L. et Steck, A (2004) - The Eastern prolongation of the Zaskar Shear Zone (Western Himalaya). Eclogae Geologicae Helvetiae, 97/2, p. 193-212.
- Fuchs, G. (1982) - The geology of Western Zaskar. Jahr. Geol. Bund. 125, 1-50
- Girard, M. (2001) - Metamorphism and tectonics of the transition between non metamorphic Tethyan Himalaya sediments and the North Himalayan Crystalline Zone (Rupshu area, Ladakh, NW India). Mém. Géol. Lausanne 35, 100 p.
- Guillot, S. and Hattori, K. (2000) Mantle wedge serpentinization and exhumation of eclogites: Insights from eastern Ladakh, northwest Himalaya, Geology, 28/3, 199-202.
- Jain A.K. et Singh S. (2009) - Geology and tectonics of the Southeastern Ladakh and Karakoram. Geol Soc. of India, Bangalore, 182 p.
- Kumar R., Ghosh S. K. et Sangode S. J. (2003) - Mio-Pliocene sedimentation history in the northwestern part of the Himalayan Foreland Basin, India. Current Science, 84, 8/25, 1006-1013
- Kumar R., Lal N., Singh S. et Jain, A.K. (2007) - Cooling and exhumation of the Trans-Himalaya Ladakh batholith, as constrained by fission track apatite and zircon ages. Curr. Sci., 92, p. 490-496.
- Mahéo G., Bertrand H., Guillot S., Mascle G., Pêcher A., Picard C. et De Sigoyer J. (2000) - Témoins d'un arc immature téthysien dans les ophiolites du Sud Ladakh (NW Himalaya, Inde). C.R.Acad. Sc Paris, 330, 289-295
- Mahéo G., Bertrand H., Guillot S., Villa I., Keller F. et Capiez P. (2004) - The South Ladakh ophiolites (NW Himalaya, India): an intra-oceanic tholeiitic arc origin with implication for the closure of Neo-Tethys. Chemical Geol., 203, 273-303.
- Mascle, G., Pêcher, A. et Guillot, S. (2010) - Himalaya-Tibet, la collision continentale Inde-Eurasie. SGF et Nepal Geological Society, Vuibert, Paris, 250 p.
- Mukhopadhyay D. K. et Mishra P. (2007) - Himalayan Frontal Fold-Thrust Belt, NW India: Geometry, Structural Evolution, and Hydrocarbon Prospects. Search and discovery #10121
- Rolland Y. (2000) - De la convergence intra-océanique à l'évolution post-collisionnelle : Exemple de la convergence Indo-Asiatique en Himalaya du NW du Crétacé à nos jours. Thèse UJF Grenoble, 262p.
- Rolland, Y. et Pêcher, A. (2001) - The Pangong granulites of the Karakorum Fault (Western Tibet): vertical extrusion within a lithospheric-scale fault ?). C.R.A.Sc., Paris, 332, pp.363-370.
- Rolland, Y. (2002) - From intra-oceanic convergence to post-collisional evolution: example of the India-Asia convergence in NW Himalaya, from Cretaceous to present. In: Rosenbaum, G. and Lister,

- G. S. 2002. Reconstruction of the evolution of the Alpine-Himalayan Orogen. *Journal of the Virtual Explorer*, 8, 185-208.
- Rolland Y., Mahéo G., Pêcher A., Villa I.M. (2008) - Syn-kinematic emplacement of the Pangong metamorphic and magmatic complex along the Karakorum Fault (N Ladakh). *J. Asian Earth Sci.*, 34, 10-25.
- Scharer U., Coperland, P., Harrison T.M. et Searle M.P. (1984) - Age, cooling and origin of postcollisional leucogranites in the Karakorum batholite, a mulisystem isotope study. *Jour. Geol.*, 98, p. 233-251.
- Schlup, M. (2003) - Exhumation history of the Western Himalaya: The Rupshu-Lahul-Kullu geochronological transect (NW India). Thèse UNIL Lausanne, 175 p.
- Spring, L. (1993) - Structures gondwaniennes et himalayennes dans la zone tibétaine du Haut Lahul - Zanskar oriental (Himalaya indien). *Mém. Géol. Lausanne* 14, 148 p.
- Steck, A., Epard, J.L., Vannay, J.C., Hunziker, J., Girard, M., Morard, A. et Robyr, M. (1998) - Geological transect across the Tso Morari and Spiti areas: The nappe structures of the Tethys Himalaya. *Eclogae geol. Helv.* 91/1, 103-121
- Steck A. (2003) - Geology of the NW Indian Himalaya. *Eclogae Geologicae Helvetiae*, 96/2, p. 147-196
- Van der Beek P., Van Melle J., Guillot S., Pêcher A., Reiners P., Nicolescu S. et Latif M. (2009) - Eocene Tibetan plateau remnants preserved in the northwest Himalaya. *Nature Geosciences*. DOI: 10.1038/NGEO503, 5p.

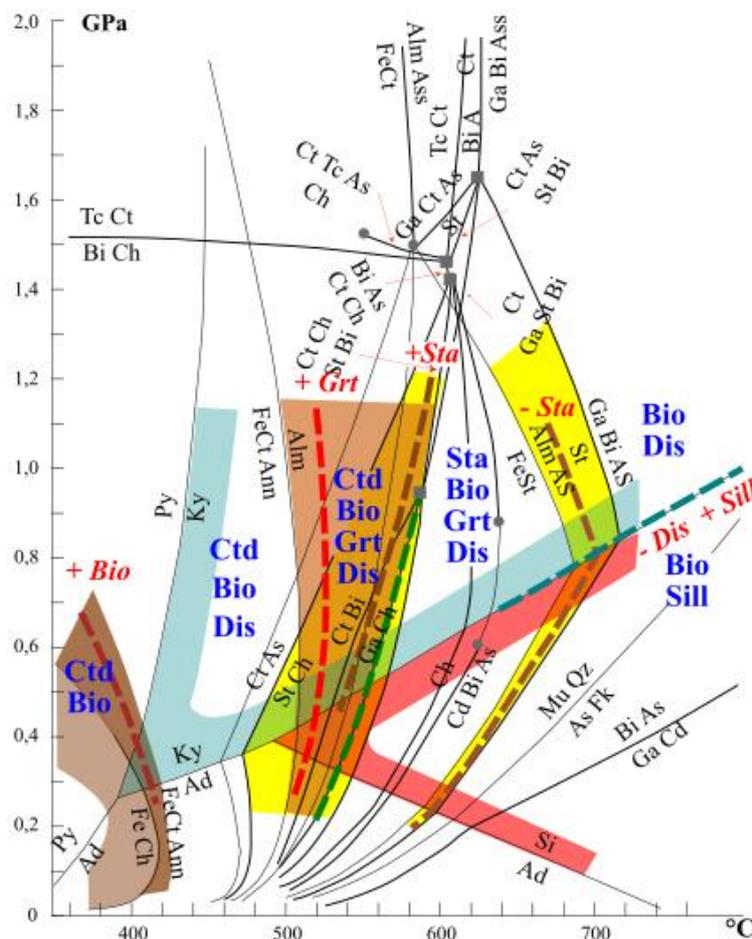


Atisha, précurseur des Bonnets Jaunes (in P. Kaplanian, *Le Ladakh*, Guides "Peuples du Monde")

### Annexe3 - Comment retrouver les conditions de formation d'une roche métamorphique ?

Il existe de nombreuses techniques pour retrouver les conditions P-T par lesquelles est passée une roche métamorphique. L'une des plus classiques et des moins sophistiquées : utiliser les courbes d'équilibre entre minéraux, reportés dans un diagramme de phase P-Tp (on parle de "**grille pétrogénétique**").

La figure suivante montre une grille adaptée aux minéraux usuels qui apparaissent dans le métamorphisme des roches silico-alumineuses (micaschistes et gneiss micassés). Elle paraît compliquée au premier abord, et pourtant **elle est établie dans un système chimique très simplifié**, ou 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 silicates ferro-magnésiens (minéraux classiques des roches argileuses et ferro-magnésiennes : biotite, grenat, staurotide...), la pyrophyllite et les polymorphes de SiAl<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (sillimanite, andalousite, disthène).



Grille P-Tp pour des roches de composition pélitique, dans le système KFMASH (Spear, 1993)  
 Abréviations pour les minéraux : **Alm**, almandin - **An**, andalousite - **Ann**, annite (biotite ferrifère) - **As**, andalousite, disthène ou sillimanite indifférenciés - **Bi**, biotite - **Cd**, cordiérite - **Ch**, chlorite - **Ct**, chloritoïde - **Fk**, feldspath potassique - **Ga**, grenat - **Ky**, disthène (kyanite) - **Mu**, muscovite - **Py**, pyrophyllite - **St**, staurotide - **Tc**, talc.

En brun : apparition et disparition du chloritoïde ; en jaune, apparition et disparition de la staurotide ; en bleu domaine de stabilité du disthène

On a essayé de placer quelques **limites d'apparition de 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 !

Remarque :

- certains éléments chimiques qui peuvent modifier significativement l'étendue du champ de stabilité de certains minéraux ne sont pas pris en compte. C'est le cas par exemple du Mn, qui abaisse beaucoup la température d'apparition du grenat,
- **les possibilités d'apparition ou de disparition d'un minéral sont généralement multiples** (par exemple 4 réactions produisent de la staurotide 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 prendre en compte 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 2 : celle 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).



Hevajra (in P. Kaplanian, Le Ladakh, Guides "Peuples du Monde")