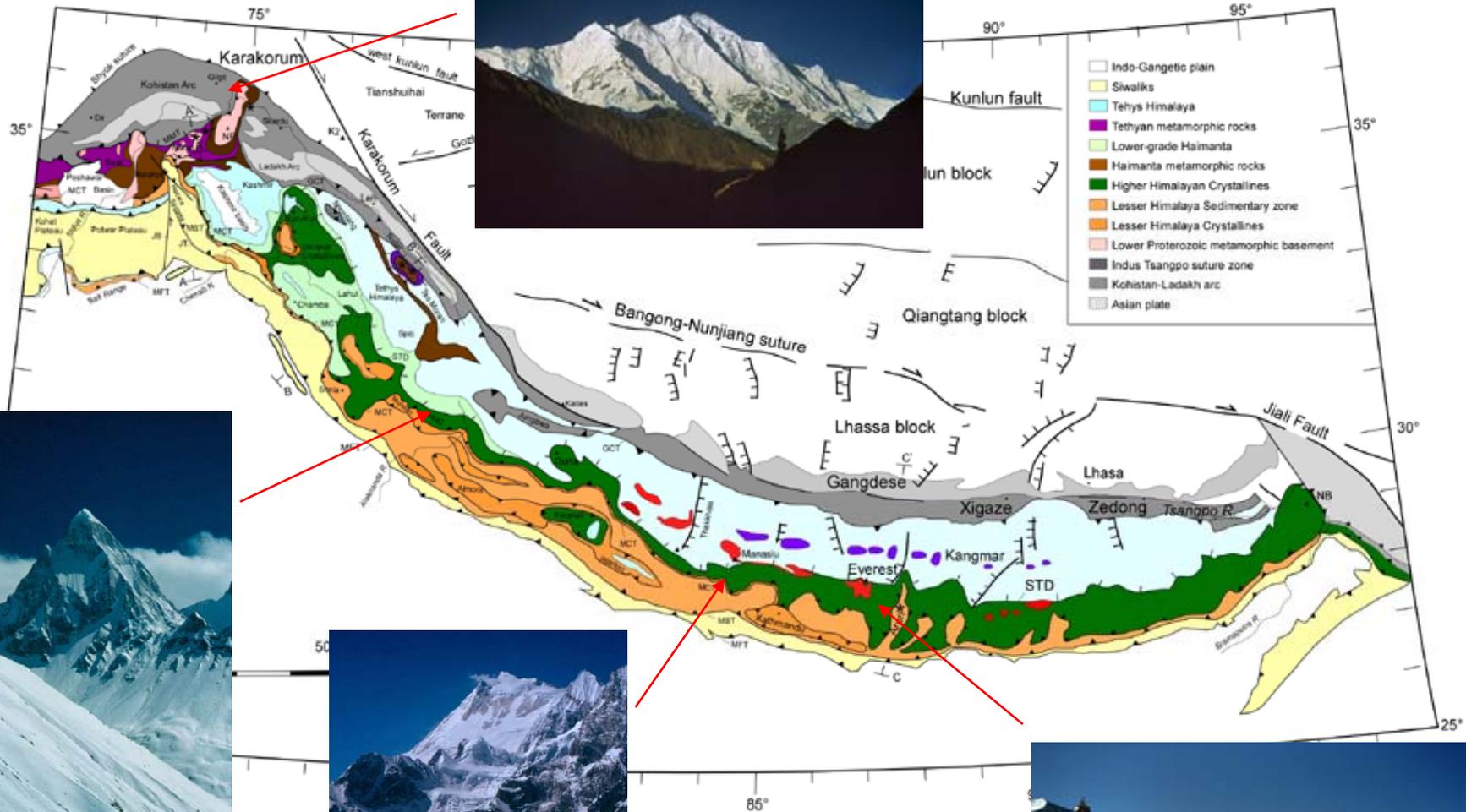


La géologie de l'Himalaya et du Sud Tibet



**Pakistan
Rakaposhi (7788 m)**



**Garhwal
Shivling (6543 m)**

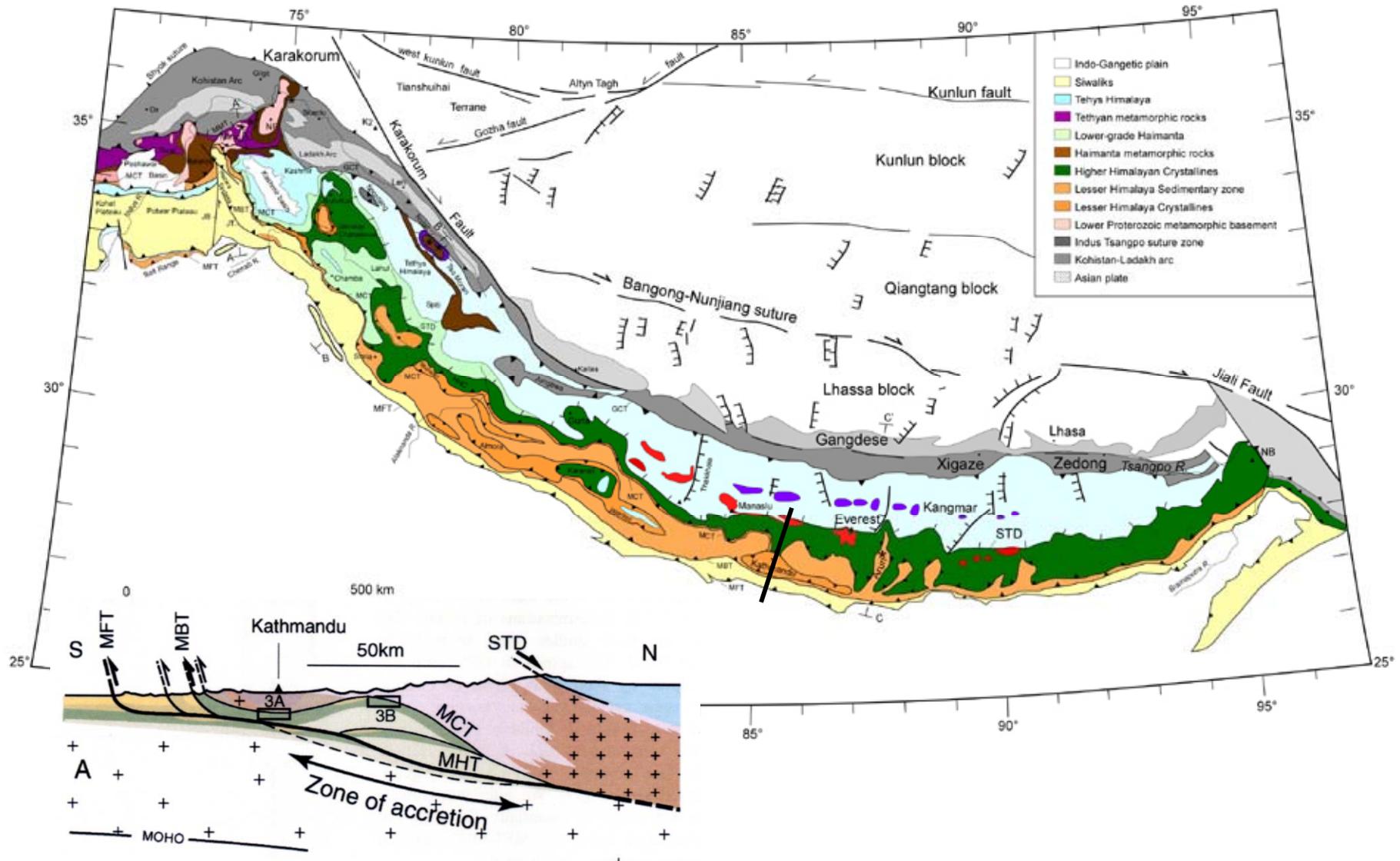


**Népal,
Manaslu (8163 m)**



**Népal - Tibet
Chomolungma (8848 m)**

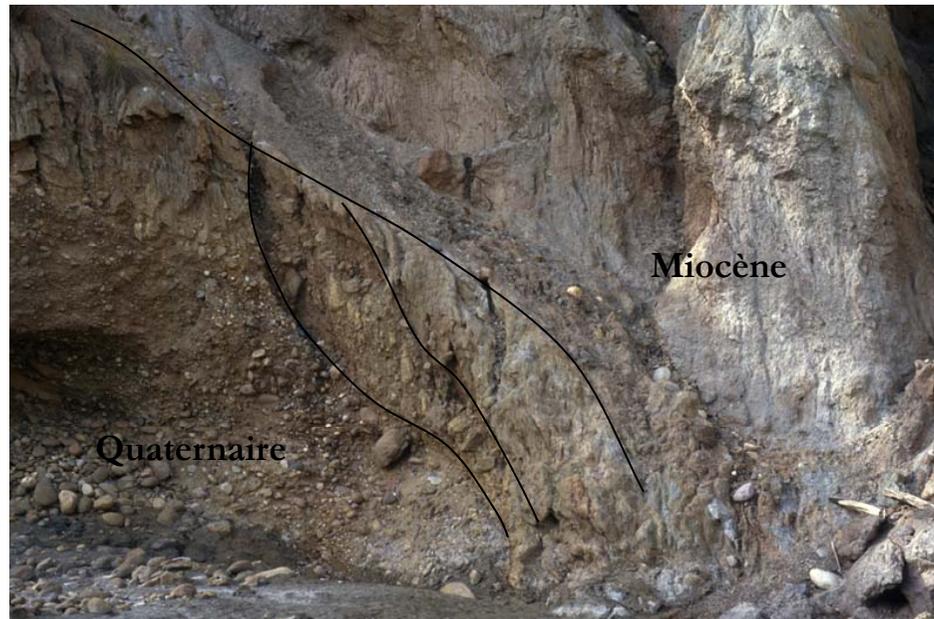
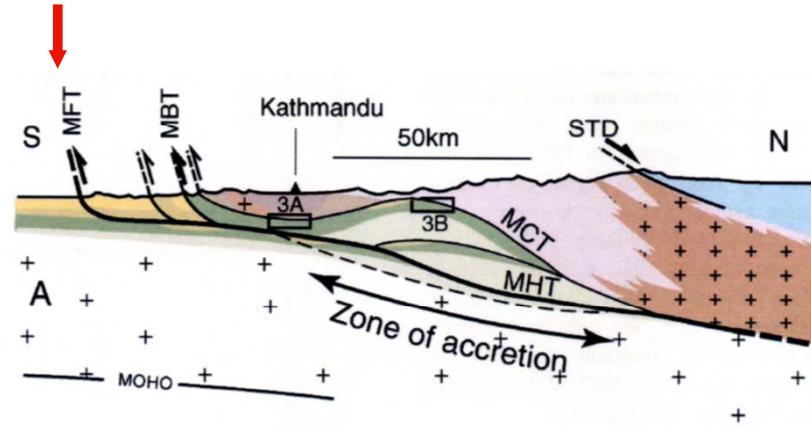
Les grandes unités géologiques en Himalaya central



Le front de l'Himalaya au Népal (Karnali, nov. 2010)

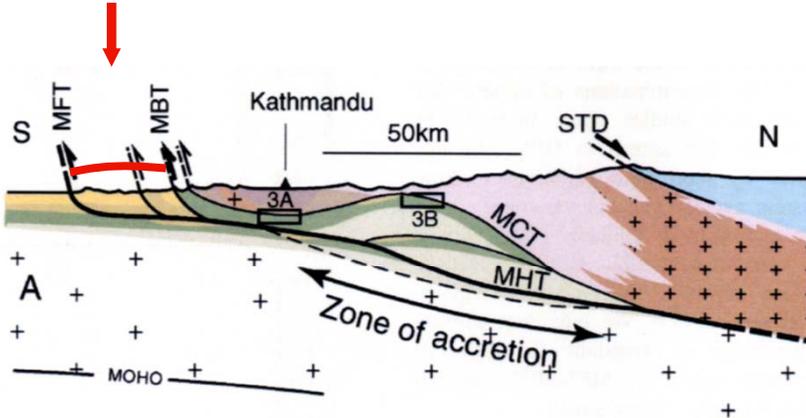


Le MFT (Chevauchement Frontal)



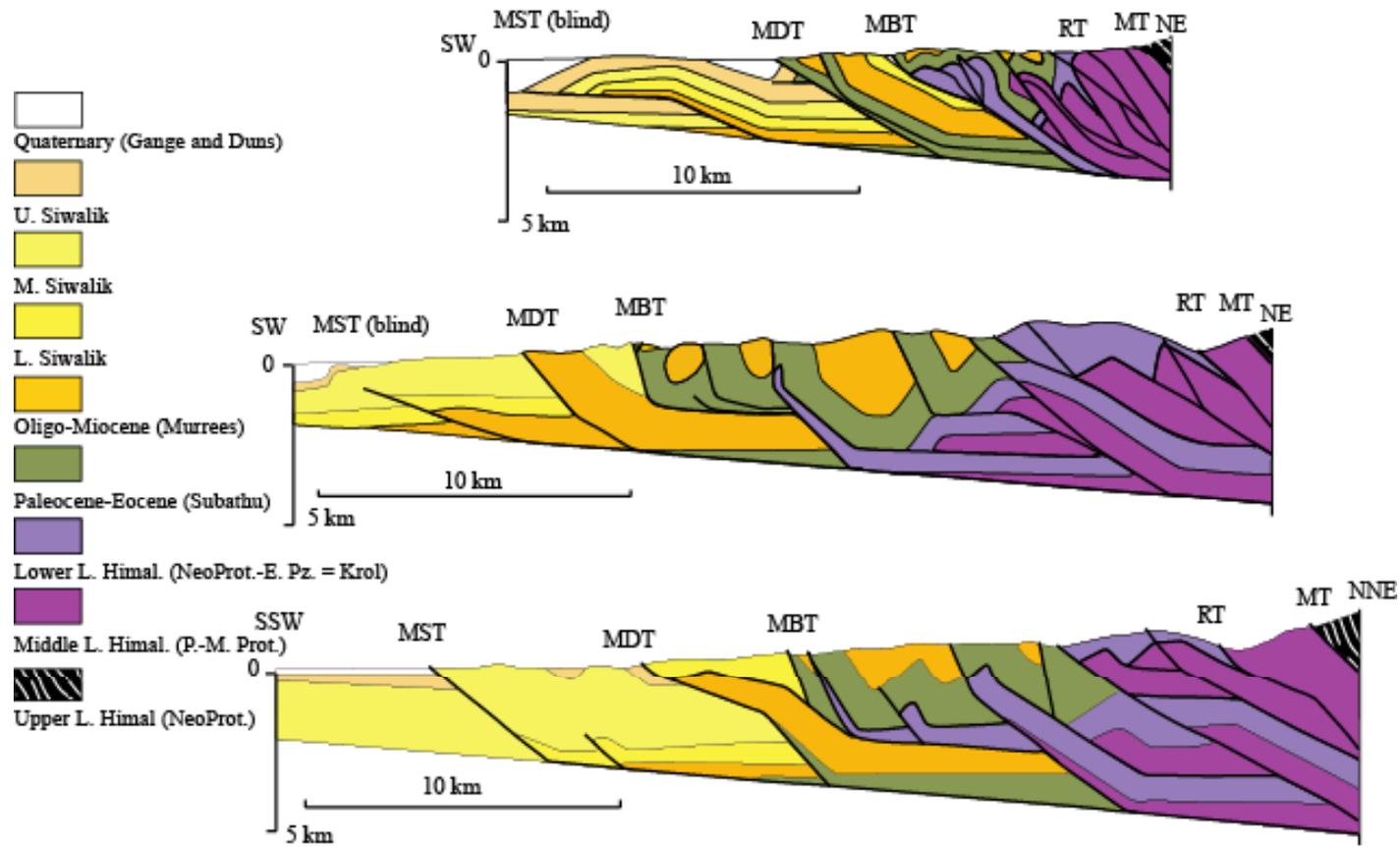
**MFT (Chevauchement Frontal)
Miocène des Siwaliks sur Quaternaire du Gange**

Les Siwaliks (le bassin flexural Miocène)

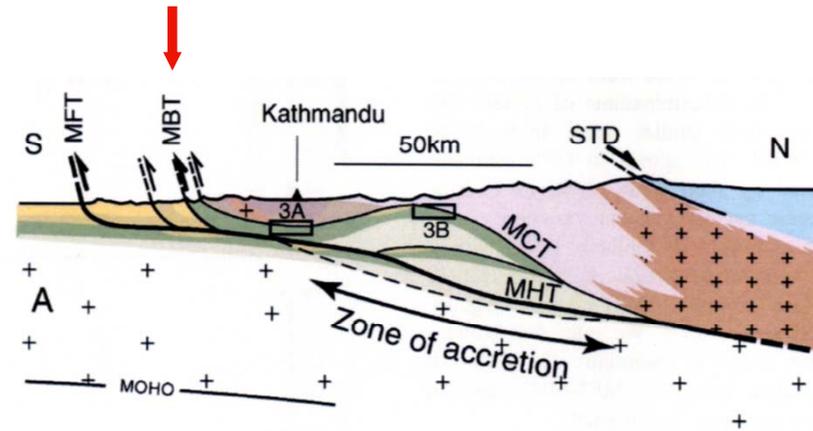


Les Siwaliks inférieurs (14 Ma)

Au front de l'Himalaya : un système de chevauchements en "plats et rampes"



Le MBT (Chevauchement Bordier)

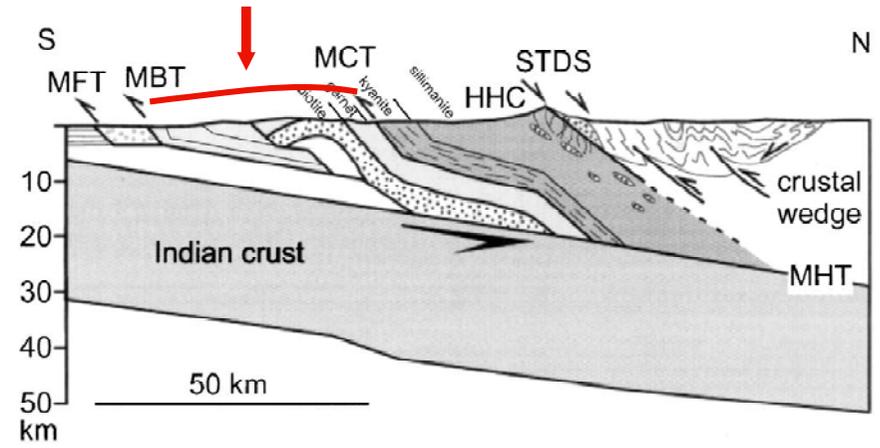


MBT (Chevauchement bordier) :
Protérozoïque et Paléozoïque du Moyen-
Pays (chaînon du Mahabharat) sur le
Miocène des Siwaliks

le Moyen Himalaya...

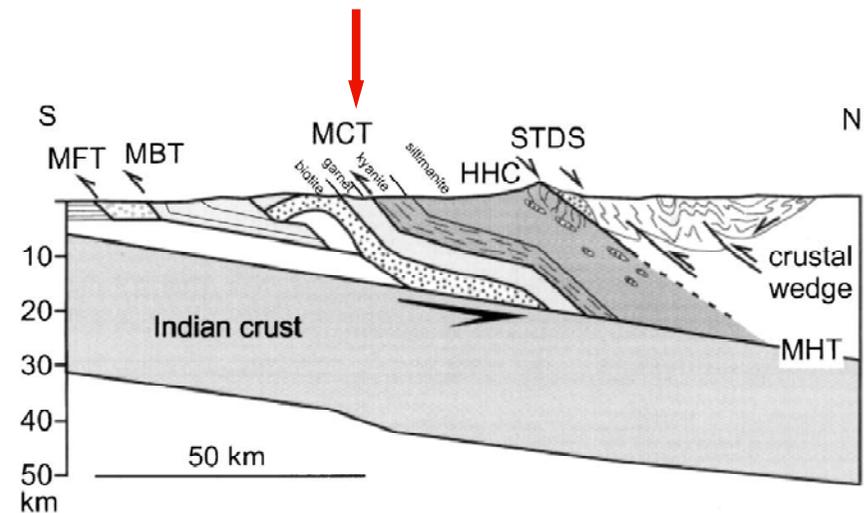
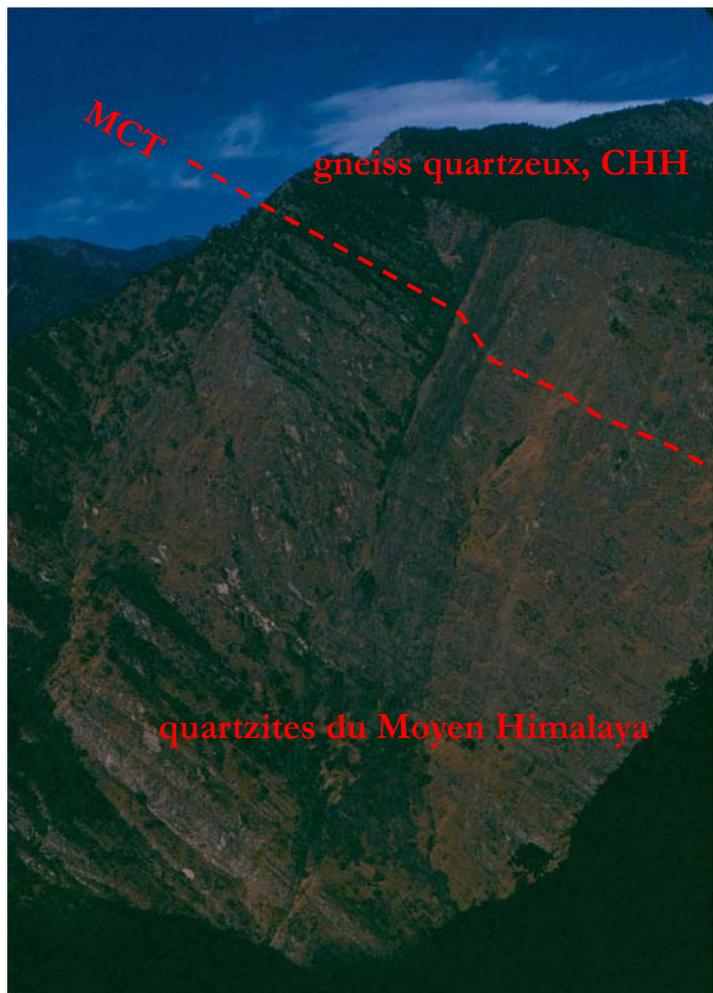


**Le Moyen Himalaya
(Moyen-Pays, Lesser Himalaya)**



Grès, Protérozoïque supérieur

**Le MCT (Chevauchement Central)
(Main Central Thrust)**



Entre Moyen Pays et Haut Himalaya,
le MCT (le Grand Chevauchement Central) :
une shear-zone majeure, peu visible à l'affleurement

en Machha Khola, au Népal

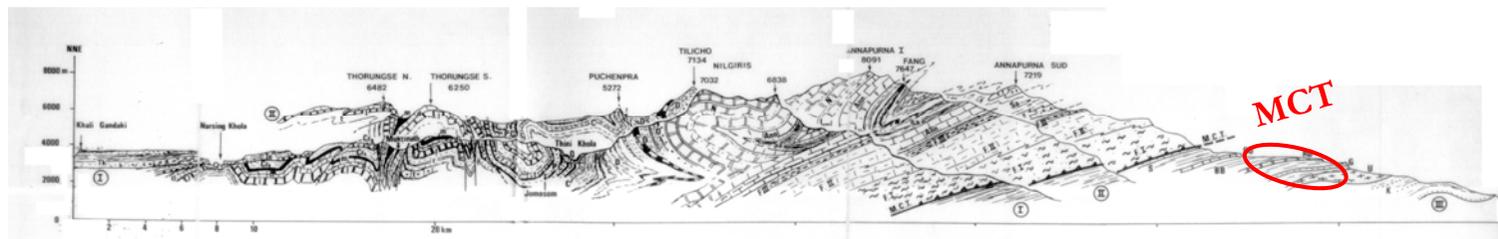
Le MCT , une épaisse (0.5 à 5 km) zone de cisaillement à vergence Sud

Une forte linéation d'étirement, N 20°E



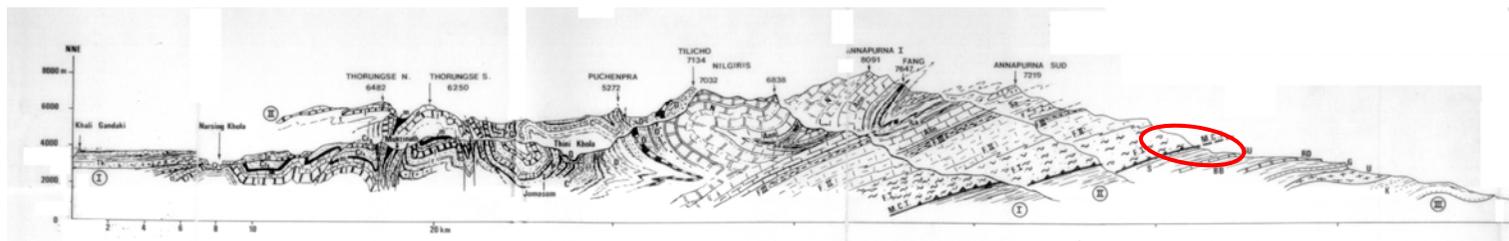
Des fabriques à symétrie monoclinique (ici : amandes C-S et C'-S)

Zone du MCT, figures de cisaillement (granite d'Ulléri, 1800 Ma)





Zone du MCT, amandes C-S
(gneiss à disthène, base du CHH)



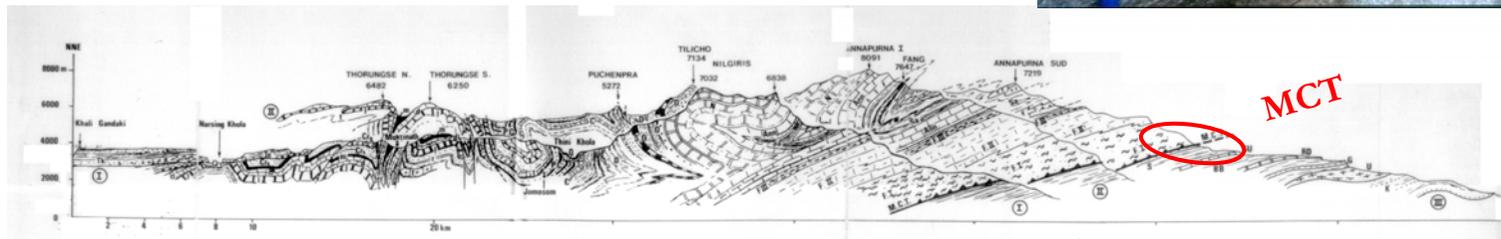
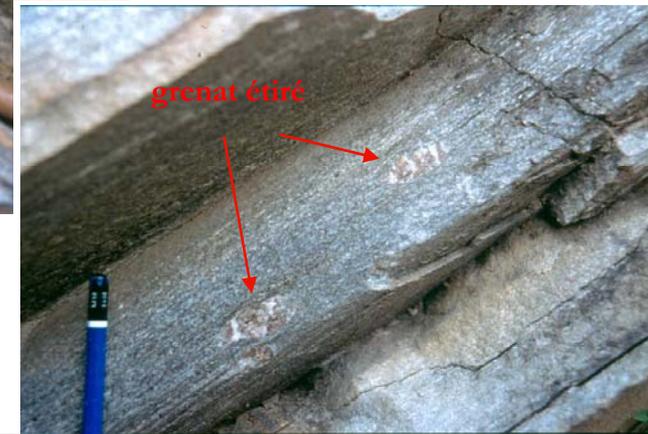


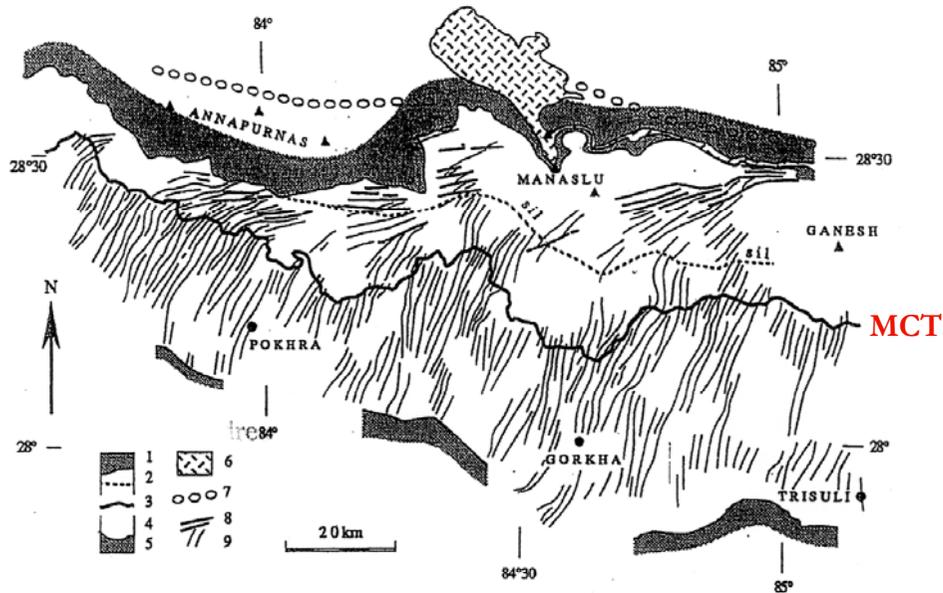
CHH : pli en fourreau dans des gneiss calciques

Zone du MCT, des plis très particuliers !



Dans des quartzites du MP : pli à charnière parallèle à l'étirement

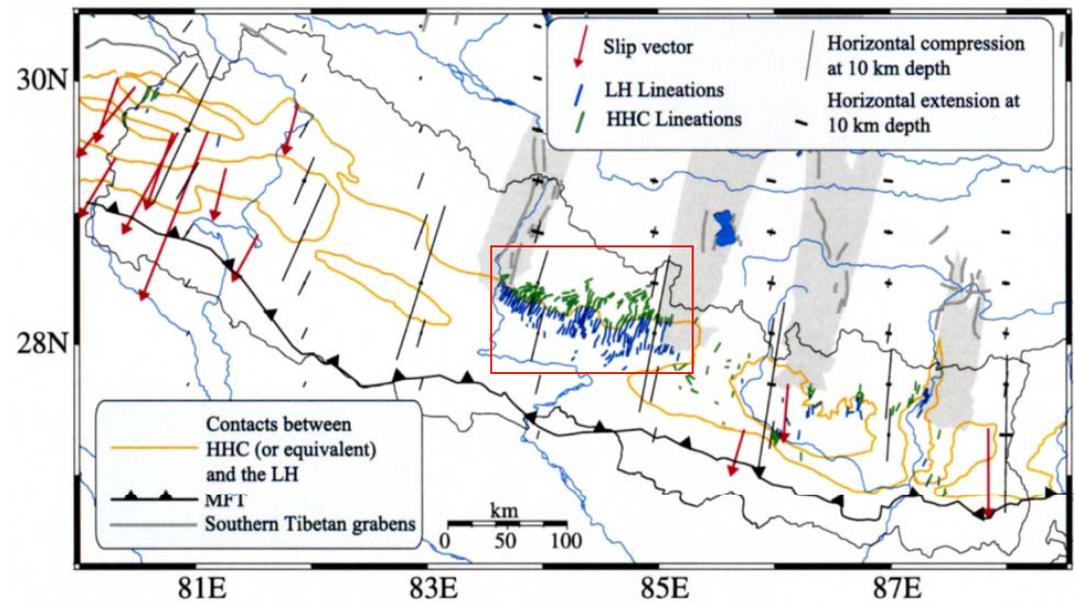




Dans toute la zone du MCT, la linéation d'étirement marque le cisaillement. Elle donne la direction de mouvement au Miocène du Haut Himalaya par rapport au Moyen Himalaya

Pêcher., 1981

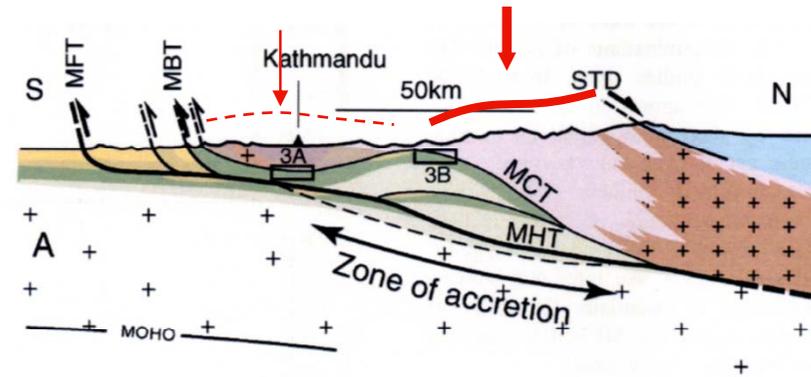
P'étirement (mesuré localement, dans la zone du MCT) correspond à la direction de convergence (de raccourcissement) à l'échelle de la chaîne !



Bollinger et al., 2004

Le Cristallin du Haut Himalaya :
gneiss et migmatites
(épaisseur : 5 à 10 km)

Les Nappes Cristallines du Moyen Himalaya (nappe de Kathmandou)



en Chumling Khola (Manaslu)

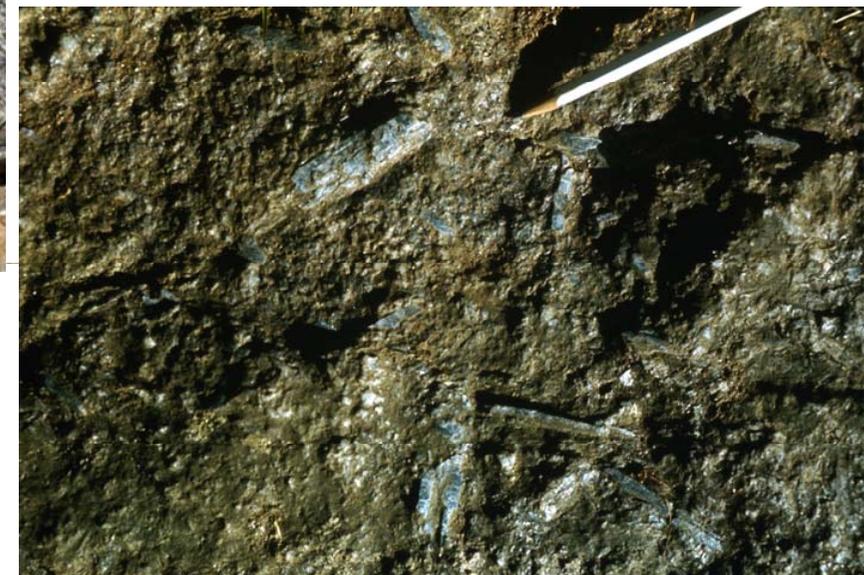
Gneiss du Cristallin du Haut Himalaya



orthogneiss
(ancien granite à 480 Ma)

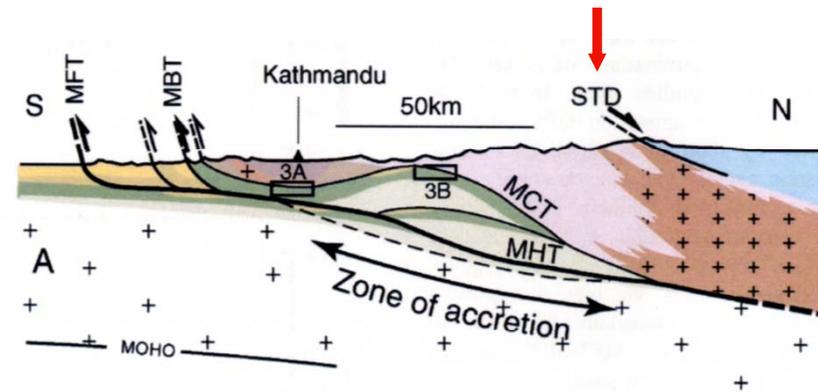
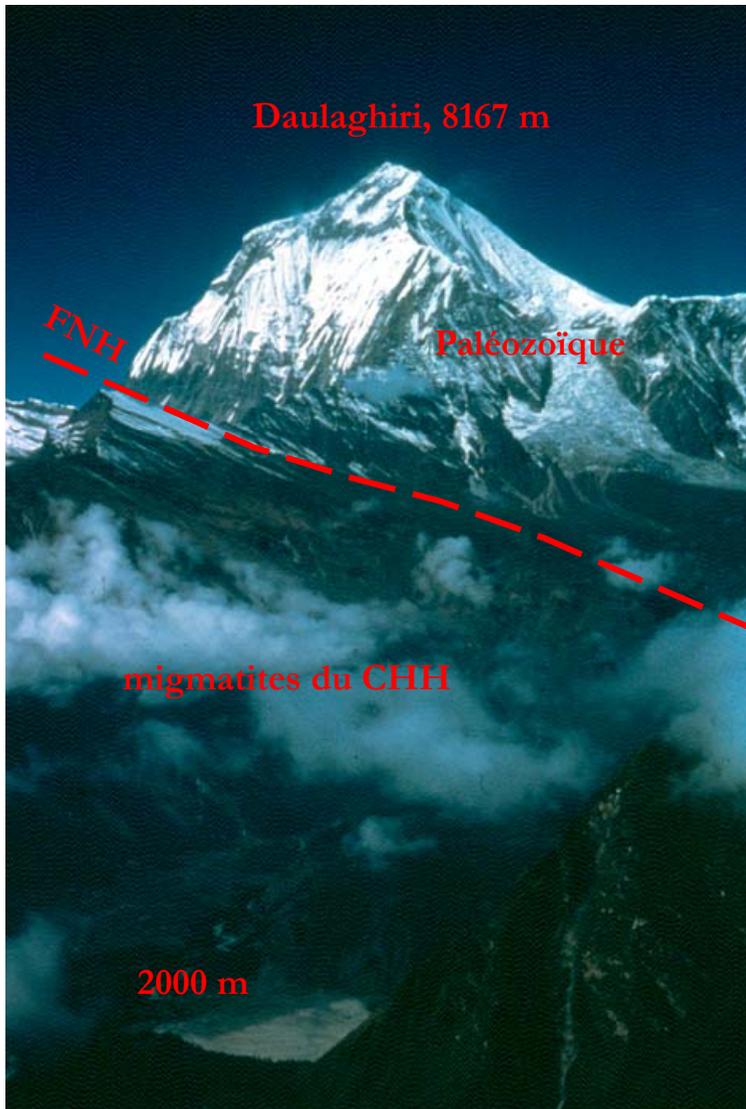


gneiss à minéraux calciques



gneiss alumineux à disthène

**Le STD ou FNH
(Faille Nord Himalayenne)**



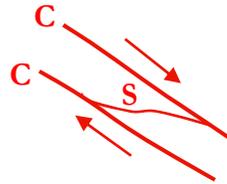
**En RD de la Kali Gandaki, le Dhaulagiri :
entre le Sédimentaire Nord Himalayen (calcaires
Cambro-Ordovicien) et les migmatites du Haut
Himalaya, la FNH**



La FNH n'est pas une faille s.str., mais comme le MCT une zone de cisaillement ductile, marquée par une linéation d'étirement et des amandes C-S

Au Zanskar, granite à tourmaline Miocène affecté par la FNH

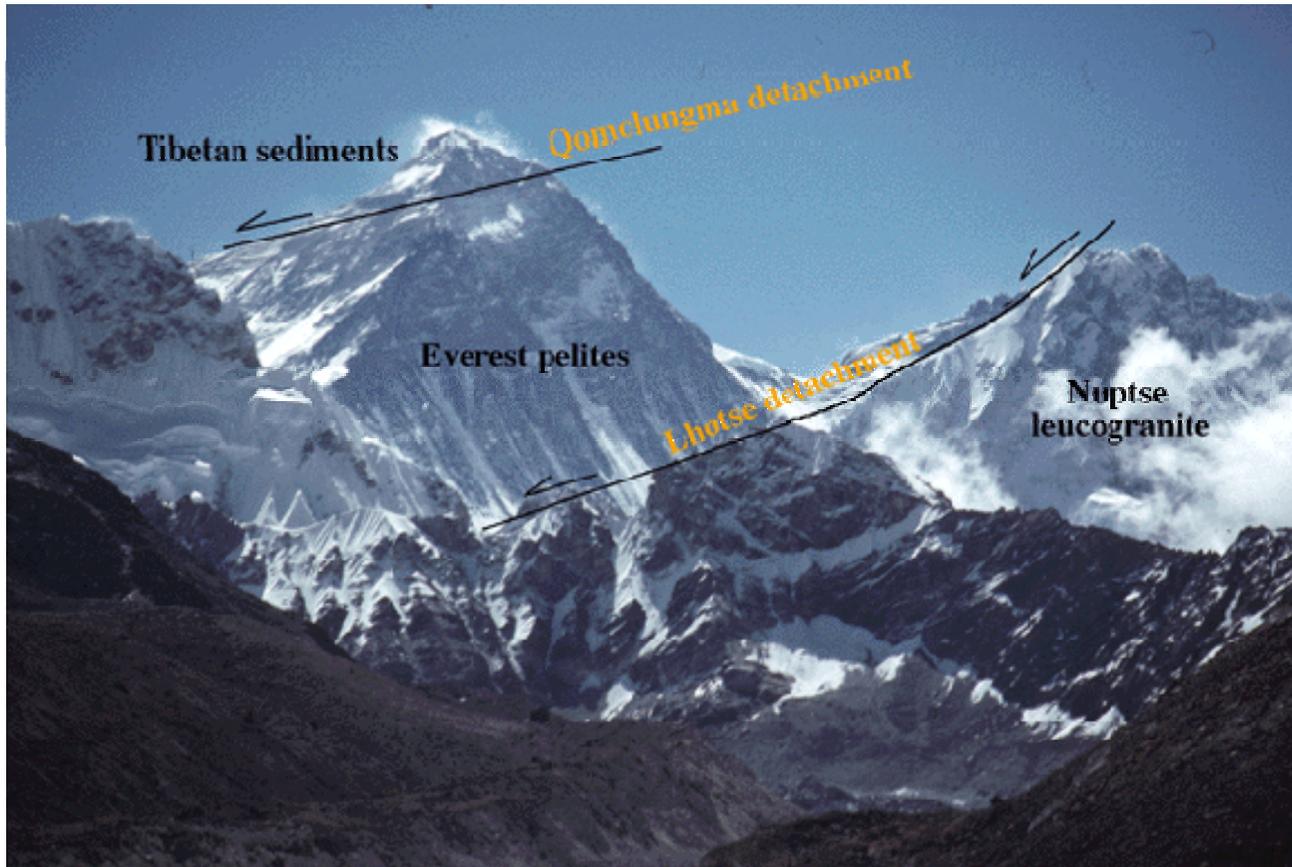
en coupe,
amandes C-S



du dessus, étirement
souligné par la tourmaline

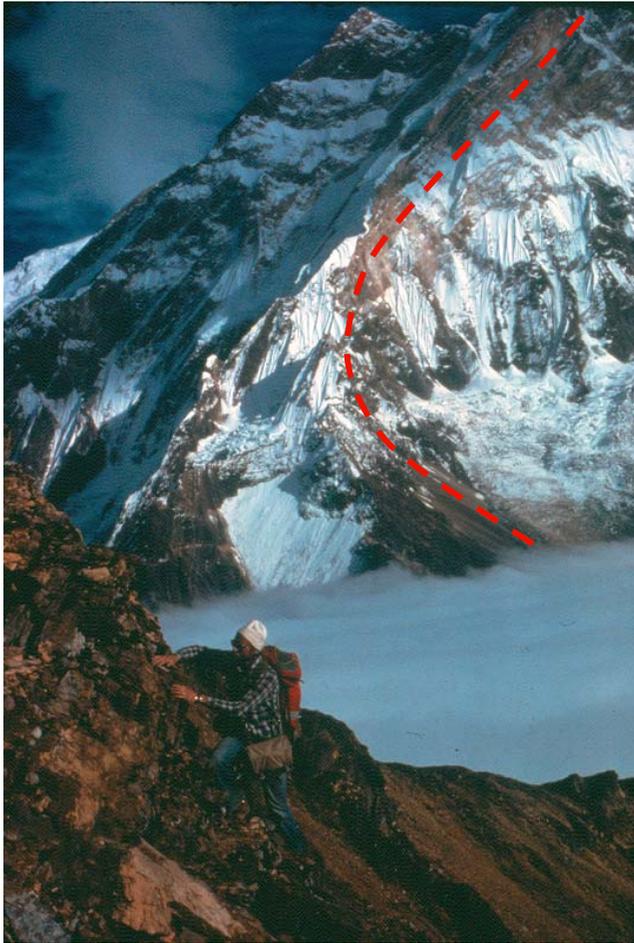


La FNH est souvent dédoublée (ici, à l'Everest),
et à faible pendage (« détachement »)

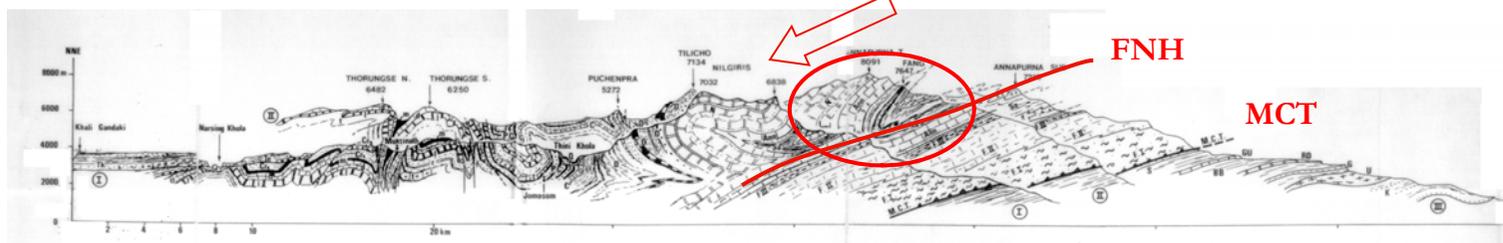


Searle et al., 2003

Une autre expression de la FNH : le pli des Annapurnas
(zone de découplage entre le CHH et sa couverture)

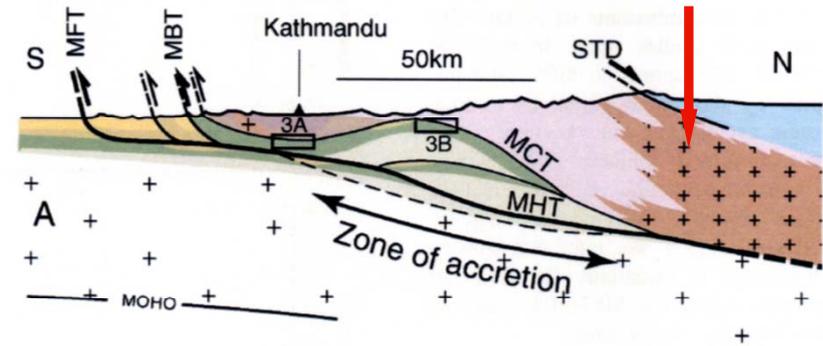


Nord

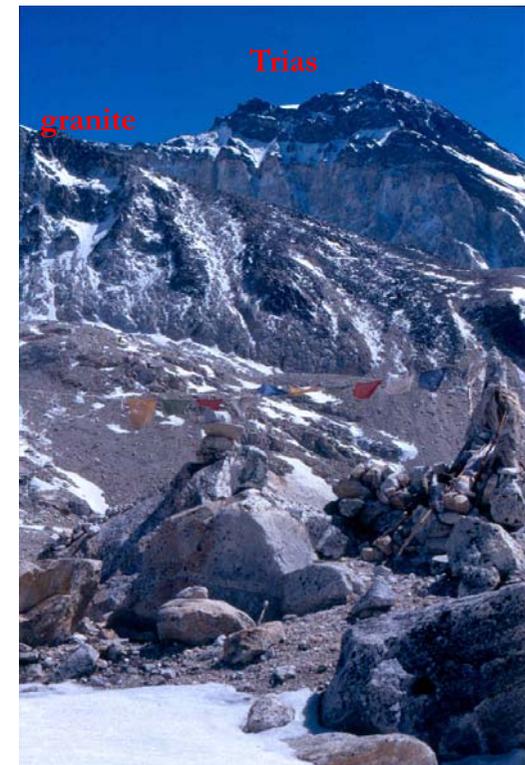


Sud

En amandes (en laccolites) dans la zone de détachement, des granites Miocènes (≈ 20 Ma), produits de la fusion du CHH



Le granite du Manaslu (8163 m) : un laccolite de plusieurs km d'épaisseur, daté de 23 Ma à 18 Ma



Contact supérieur, dans le Trias



Laccolite boudiné

Au Garhwal, le granite de Gangotri (23 Ma)

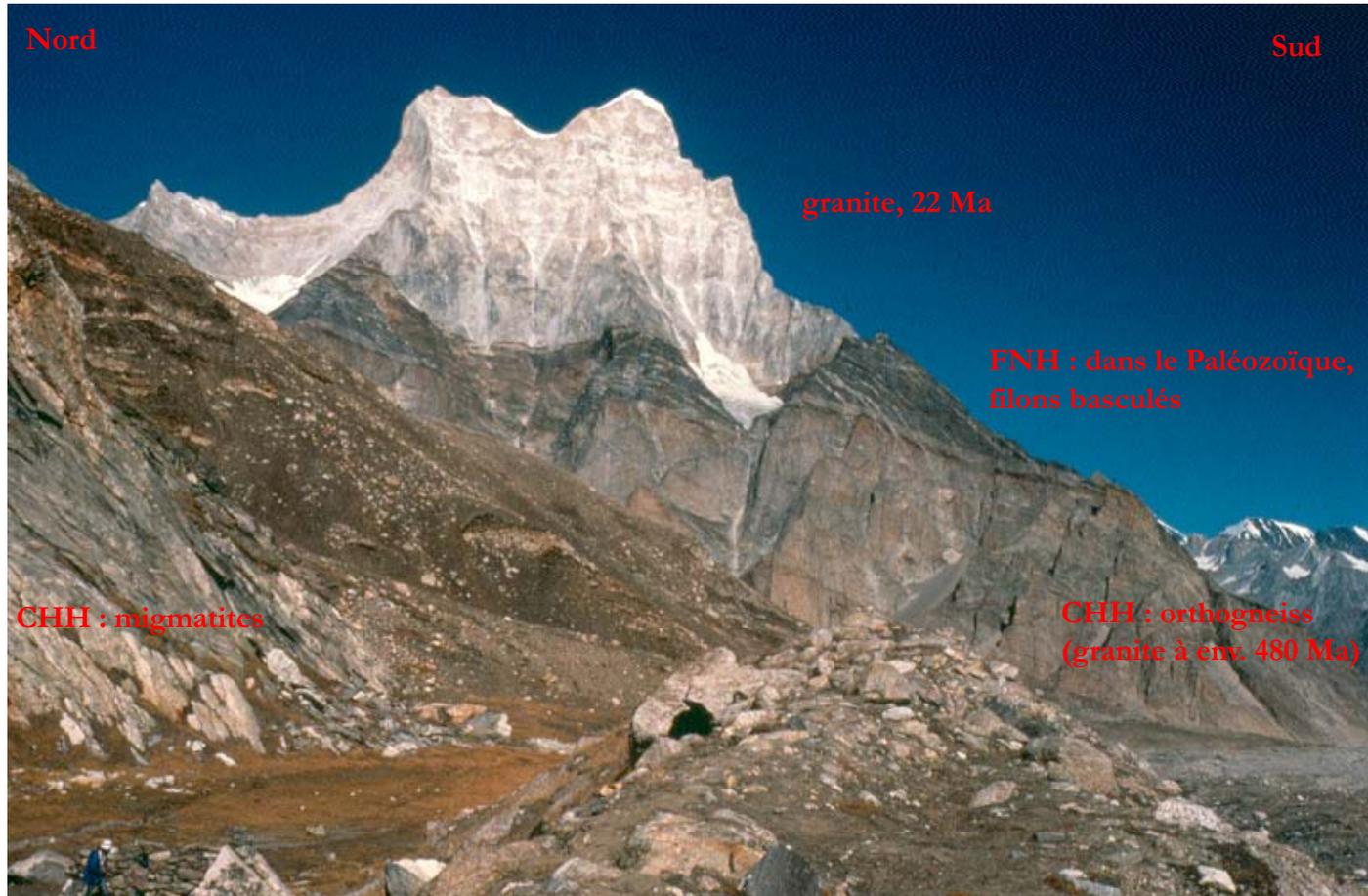


granite, 23 Ma

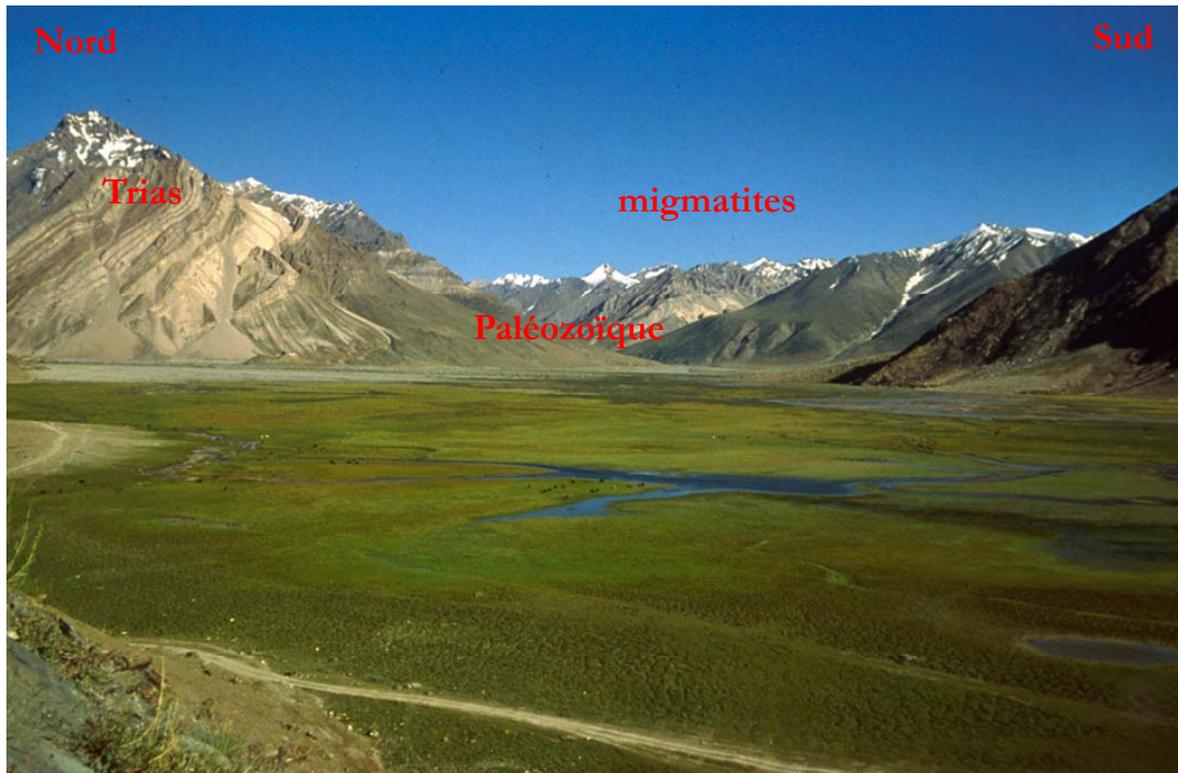
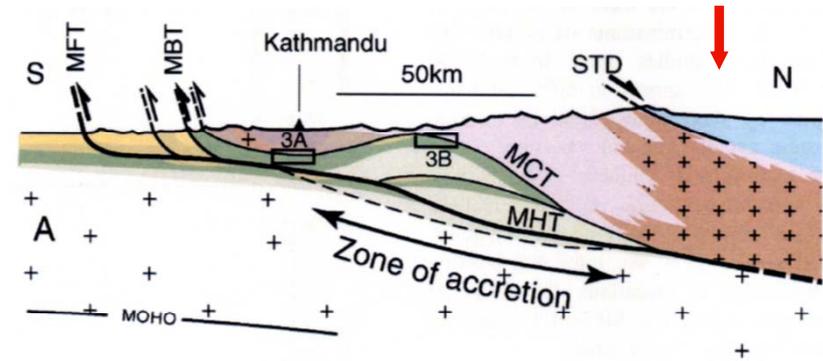
Orthogneiss (granite à env. 480 Ma)

Filons d'alimentation du granite,
basculés dans le cisaillement FNH

Au Garhwal, le granite du Shivling (22 Ma)



**Au dessus de la FNH,
le Sédimentaire Nord Himalayen,
Paléozoïque et Mésozoïque**



Au Zanskar

**Le Haut Himalaya sédimentaire : Annapurnas I (8091m) et Fang
(calcaires du Paléozoïque)**



L'Everest (8848 m) vu du Nord (calcaires du Paléozoïque)

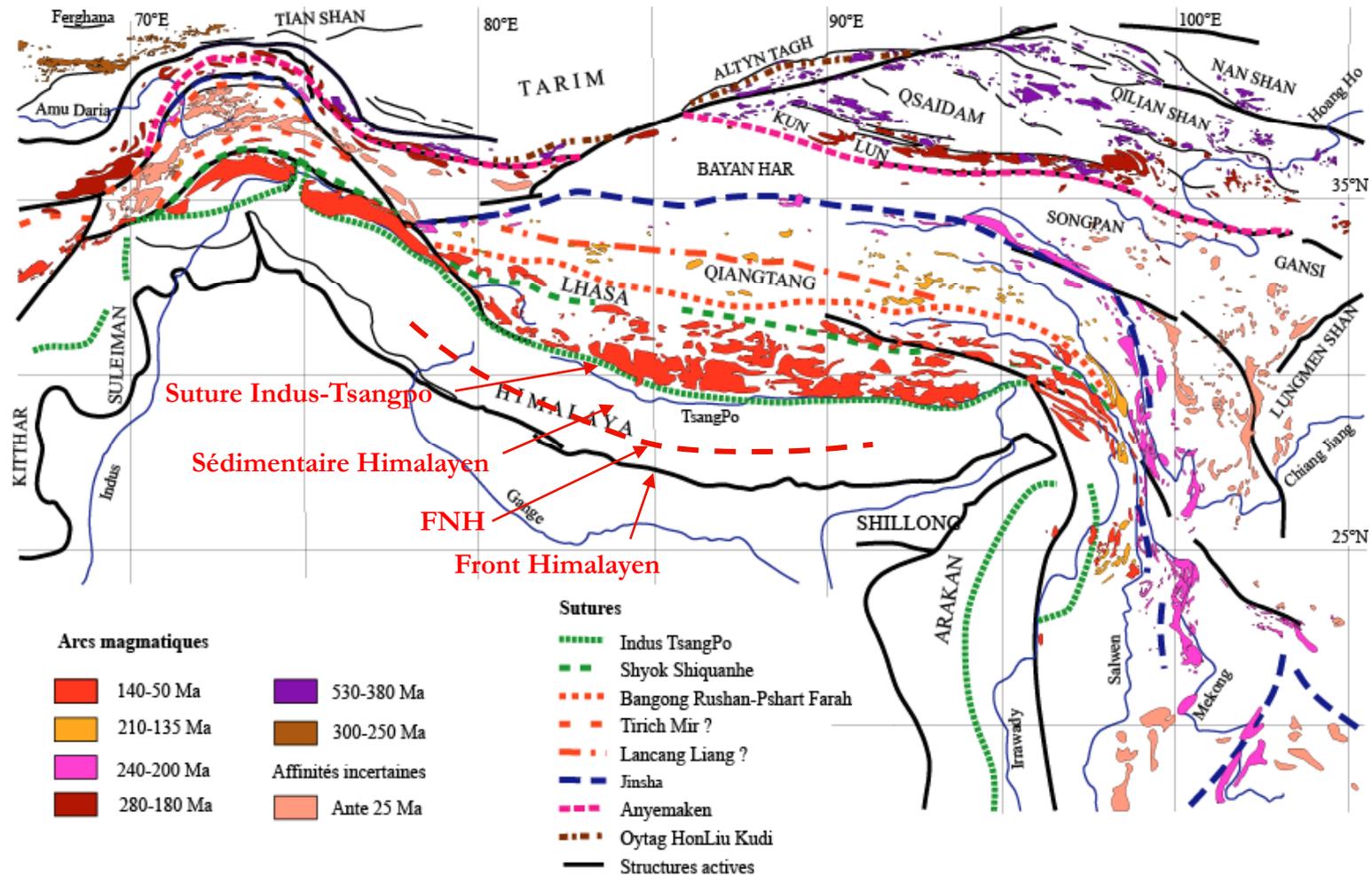


En Himalaya Central, la FNH marque souvent le passage au Tibet morphologique (\neq Tibet géologique)

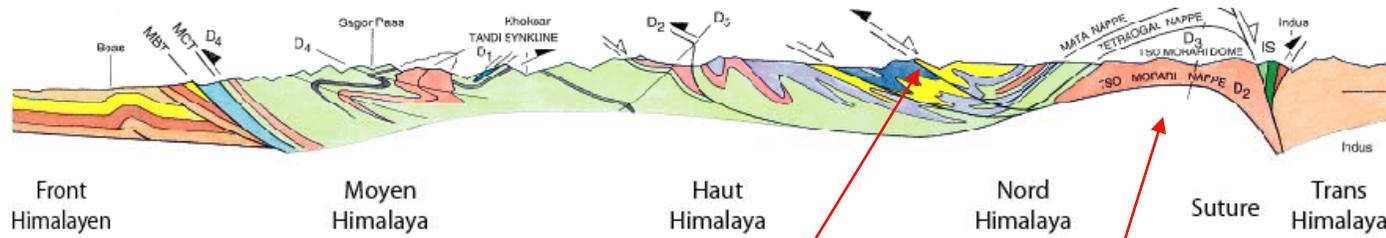


A la frontière Tibet-Bouthan, le Kula Kangri (7495 m) vu du plateau Tibétain

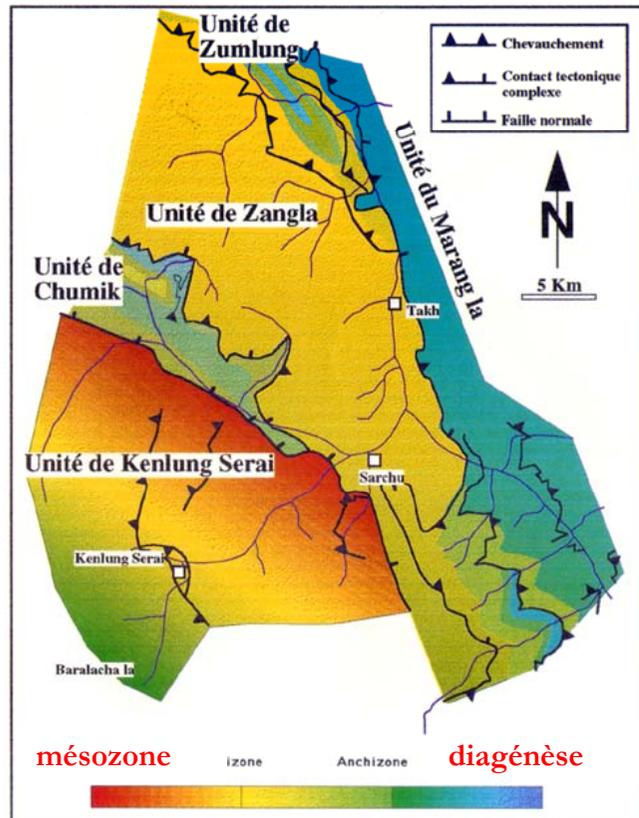
Le Tibet « géologique » : au N de la suture Indus-Tsangpo.
 Arcs magmatiques de type Andin, de plus en plus vieux vers le Nord
 (subductions océaniques et accrétions successives de blocs continentaux)



Le Nord Himalaya : une pile de nappes peu ou pas métamorphiques, à vergence Sud



une nappe inférieure très métamorphique (Tso Morari)

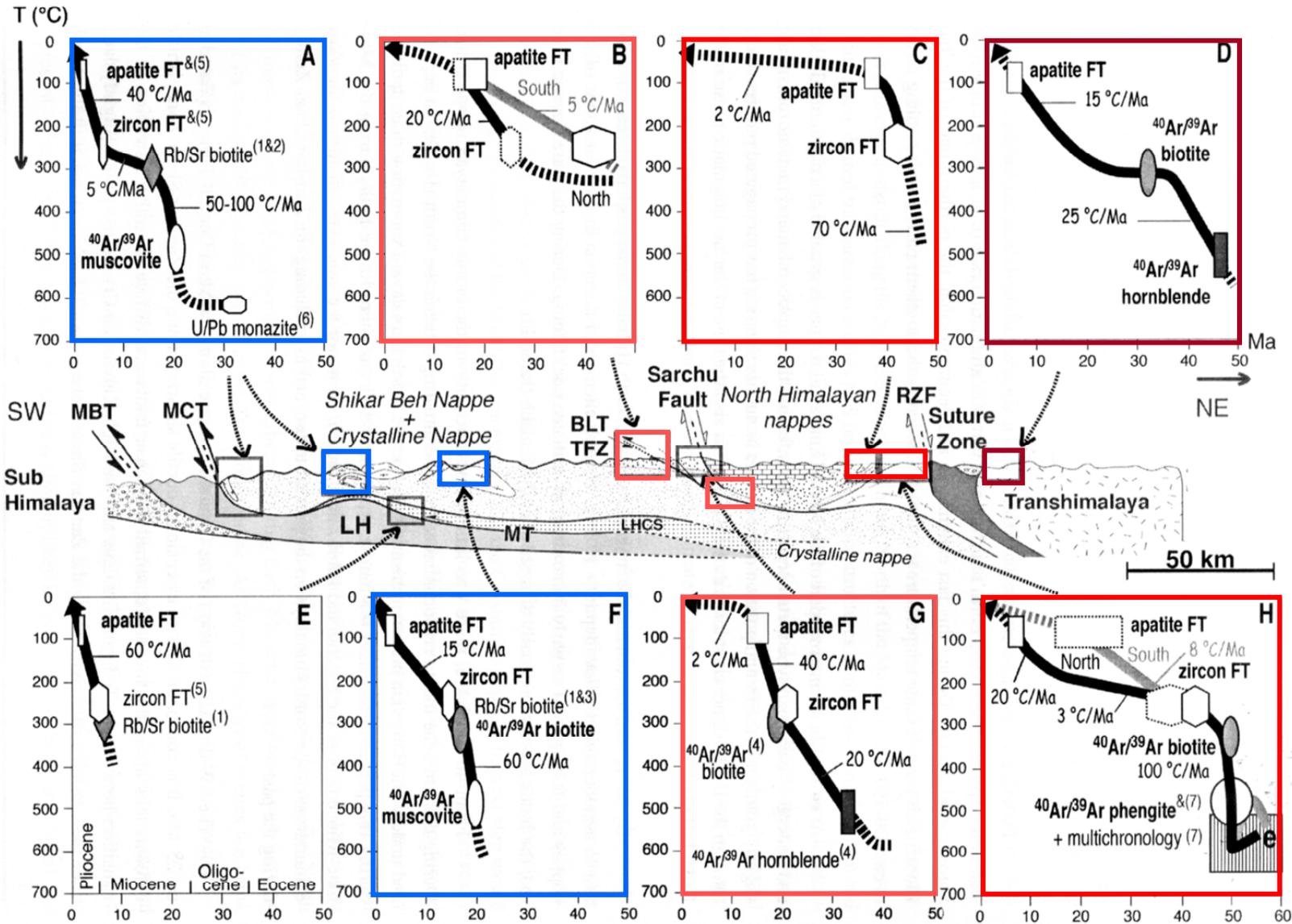


Spring, 1993

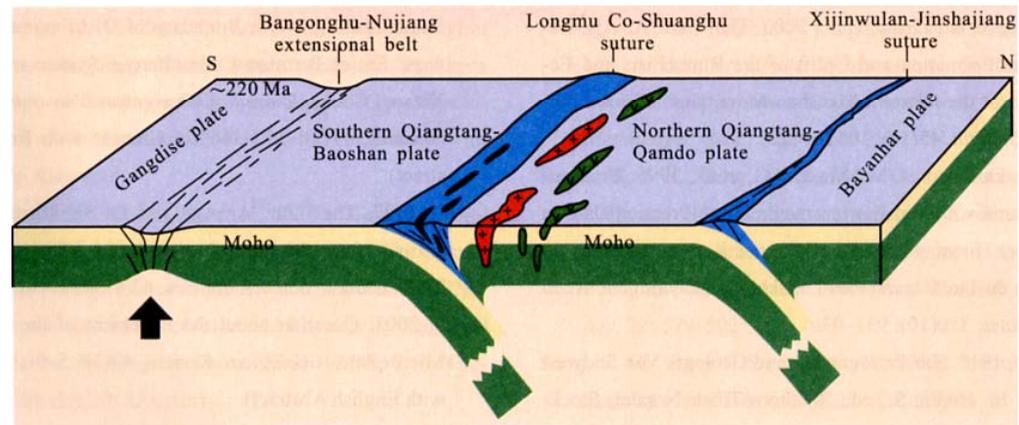
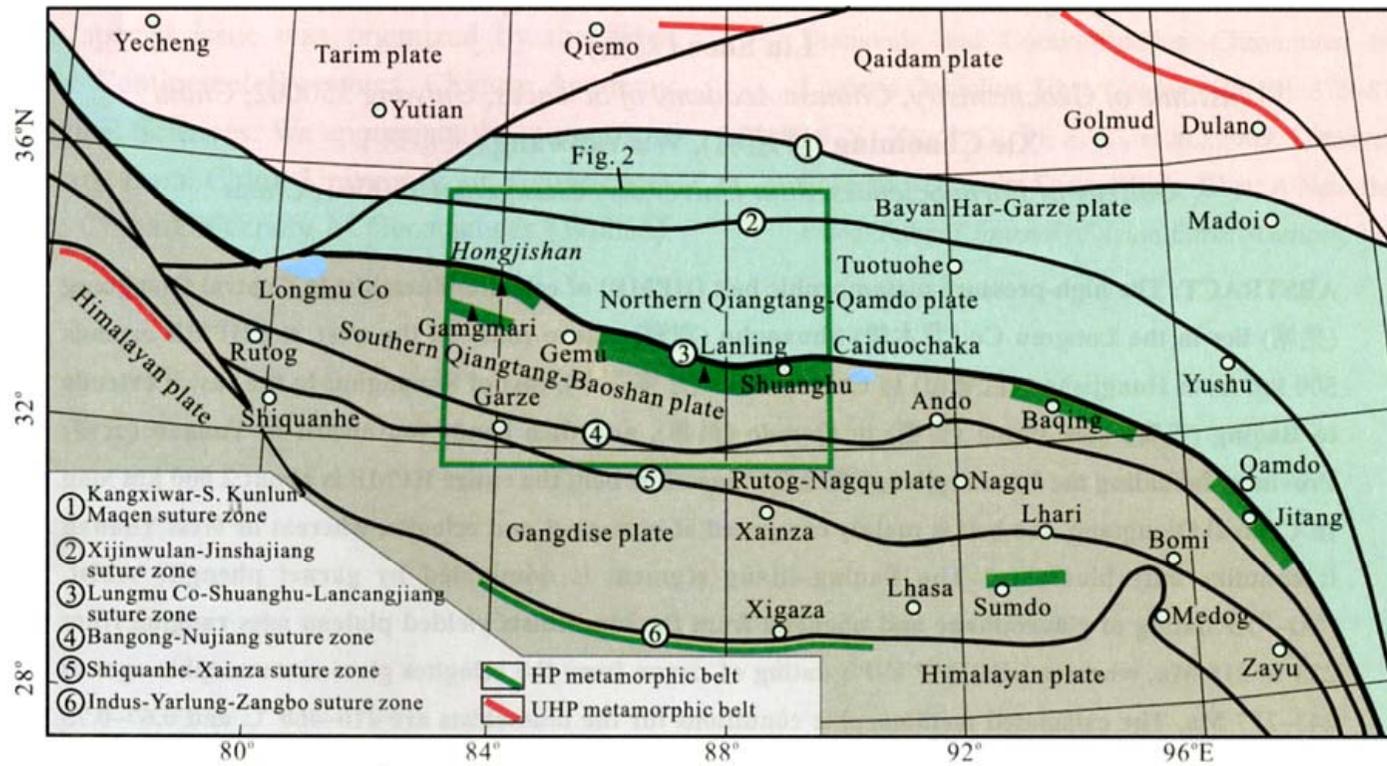
Dans les nappes du Nord Himalaya, une structuration plus ancienne que dans celles du Haut Himalaya (hors Shikar Beh)

Sud: exhumation Néogène

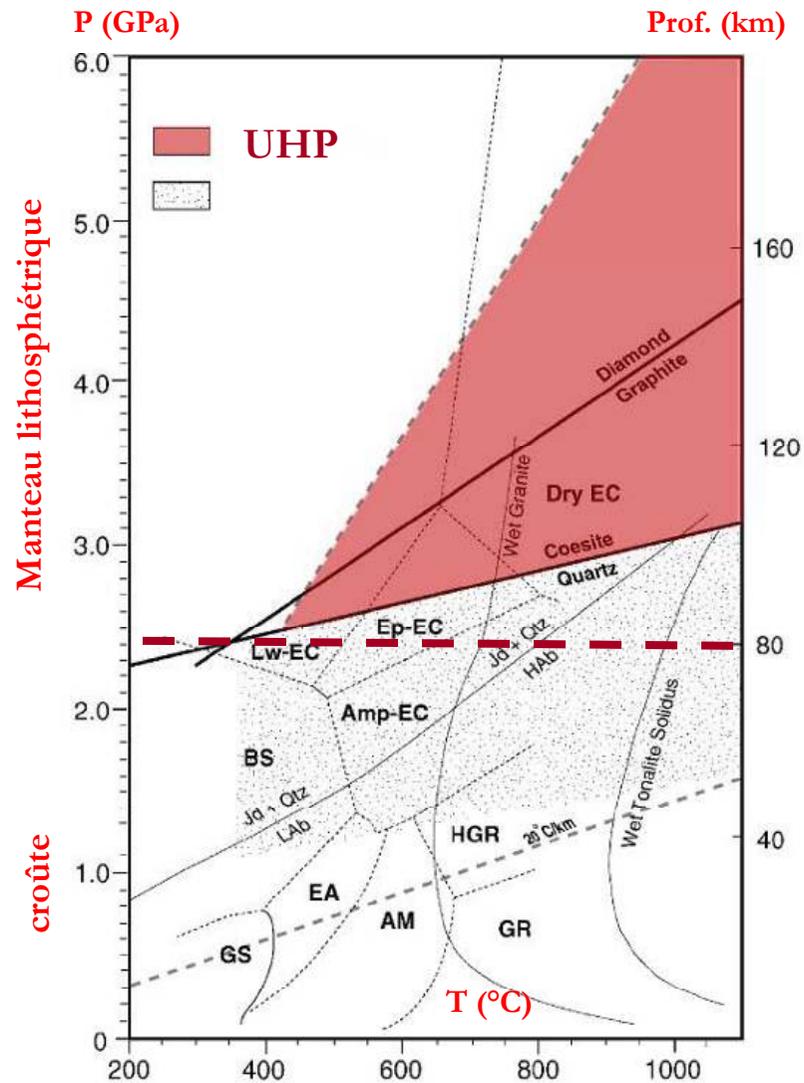
Nord : exhumation Eocène



Autant de sutures, autant de subductions...



... dont certaines associées à de l'UHP (diamant métamorphique) :

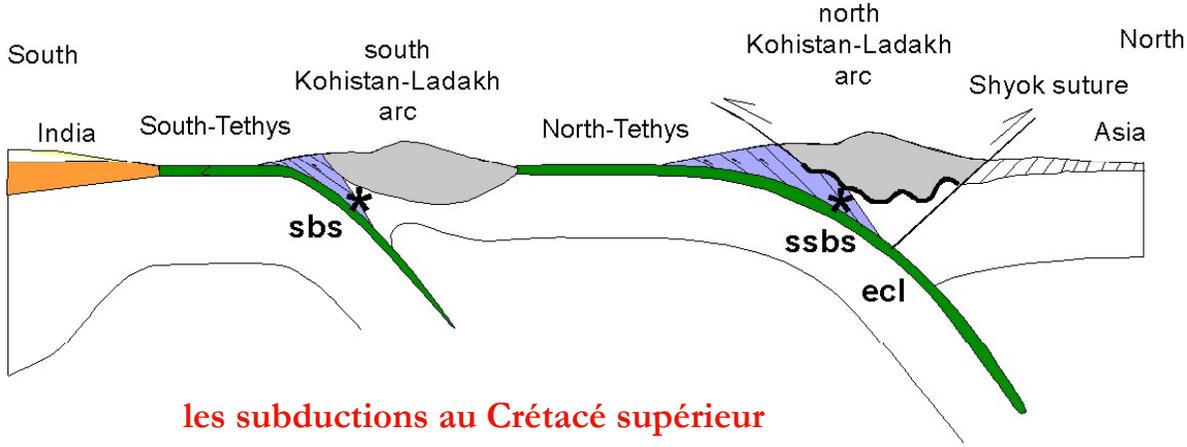
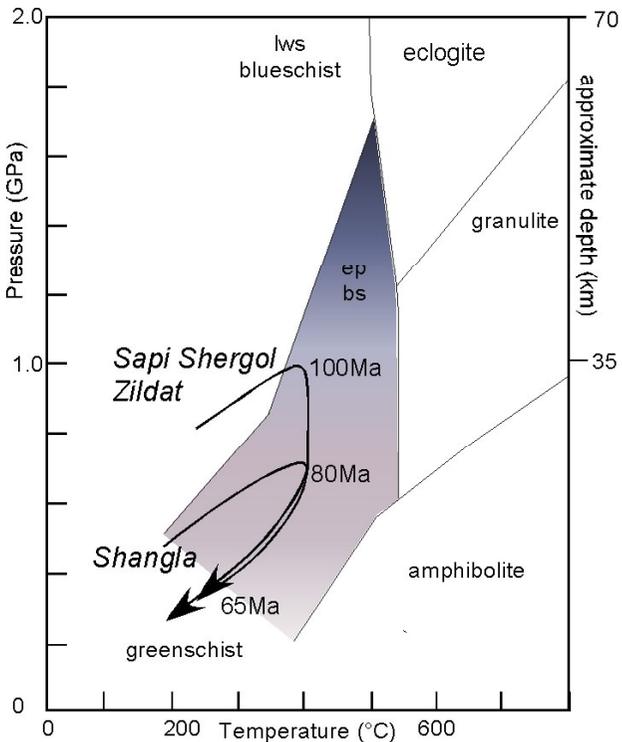


des traces en surface d'une lithosphère descendue à 120 km ou plus !

Les schistes bleus : prisme d'accrétion océanique en arrière, puis en avant de l'arc Kohistan - Ladakh

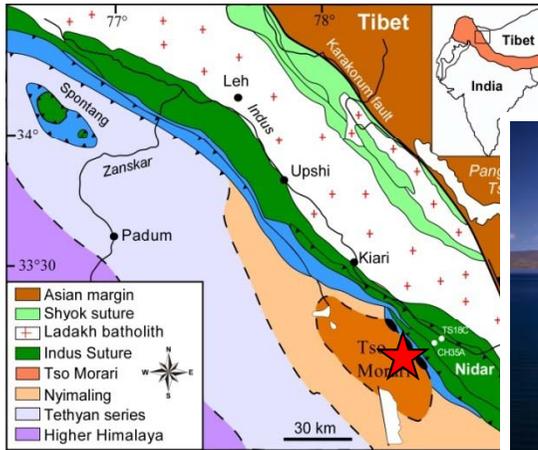


Col du Shangla, Pakistan



les subductions au Crétacé supérieur

La subduction continentale : des éclogites

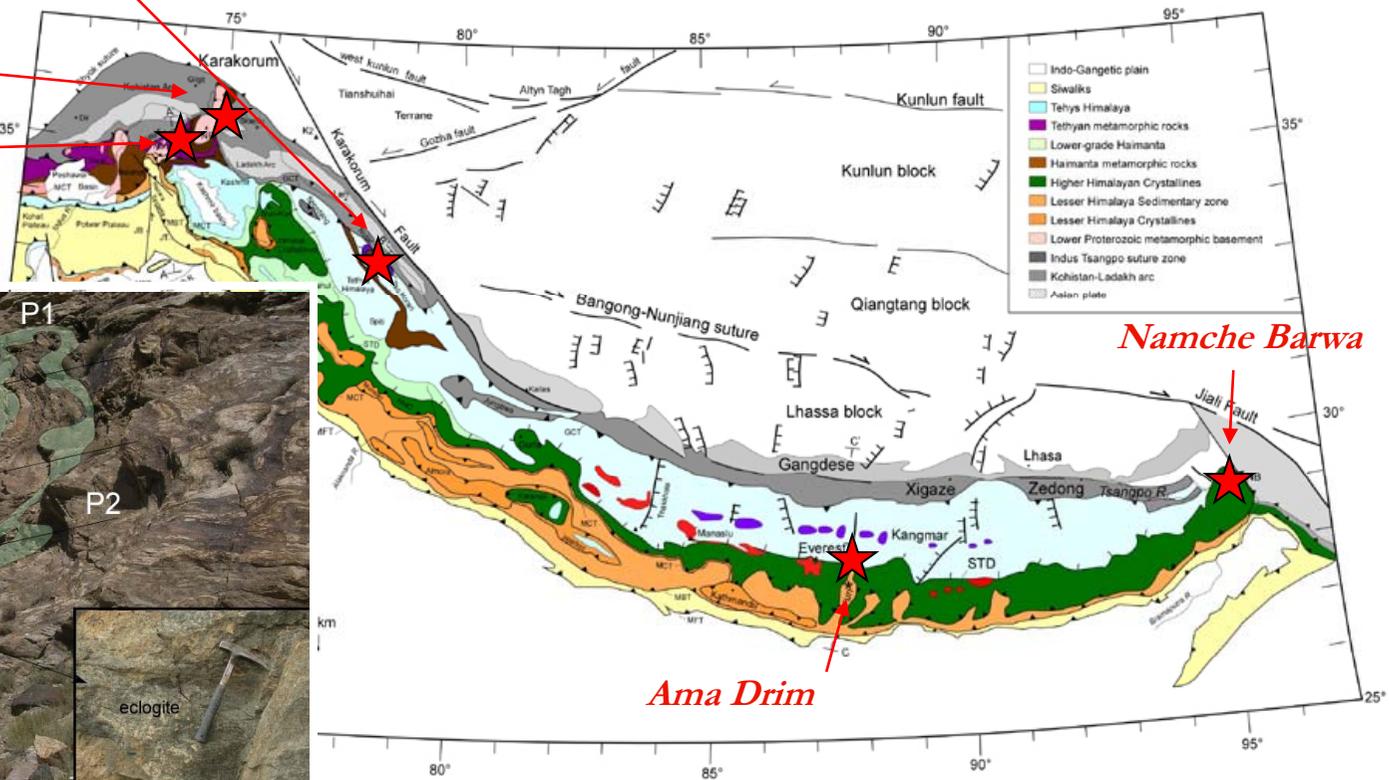
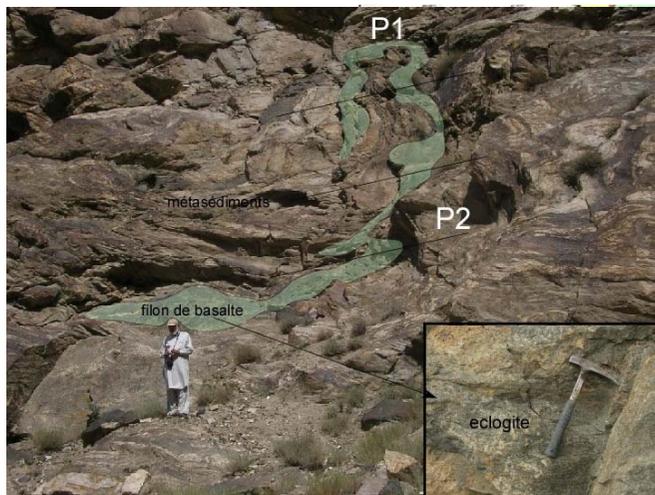


Tso Morari

Stack

Kaghan

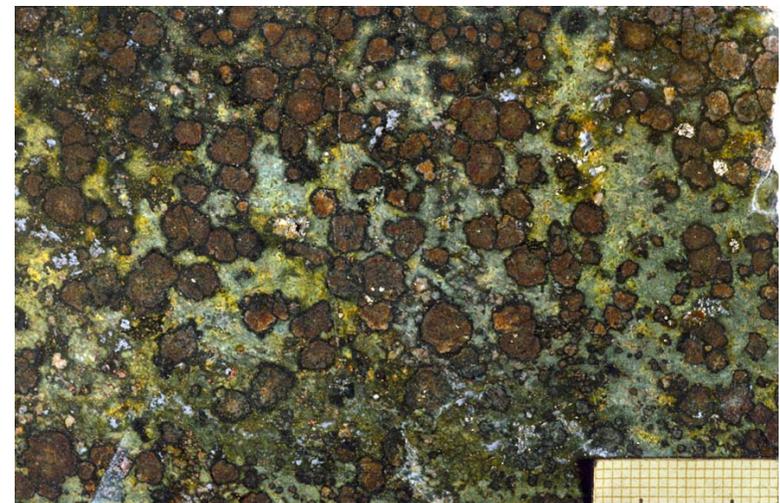
Stack



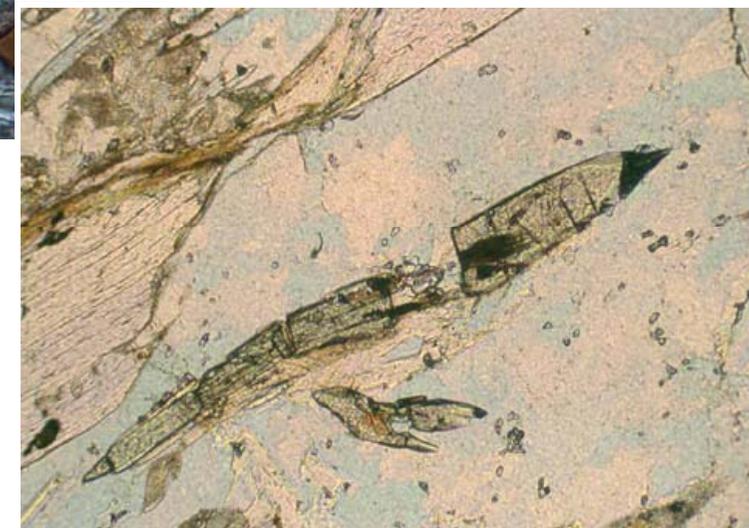
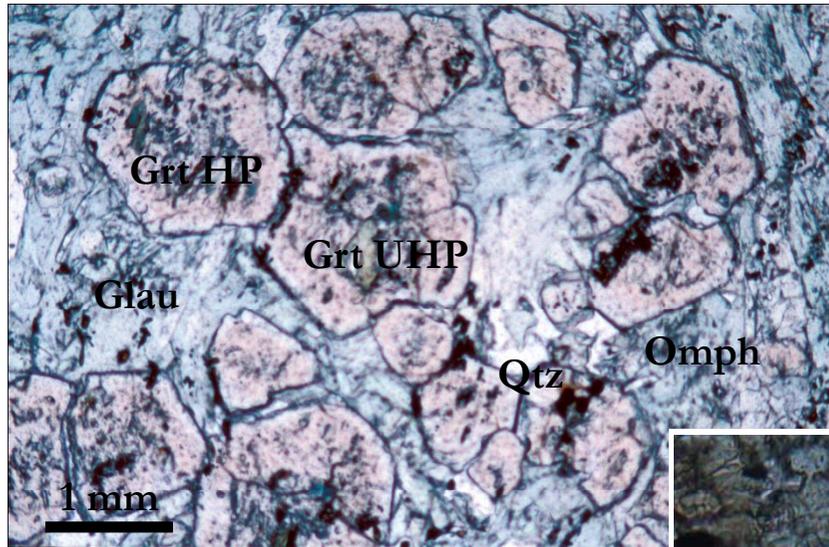
Namche Barwa

Ama Drim

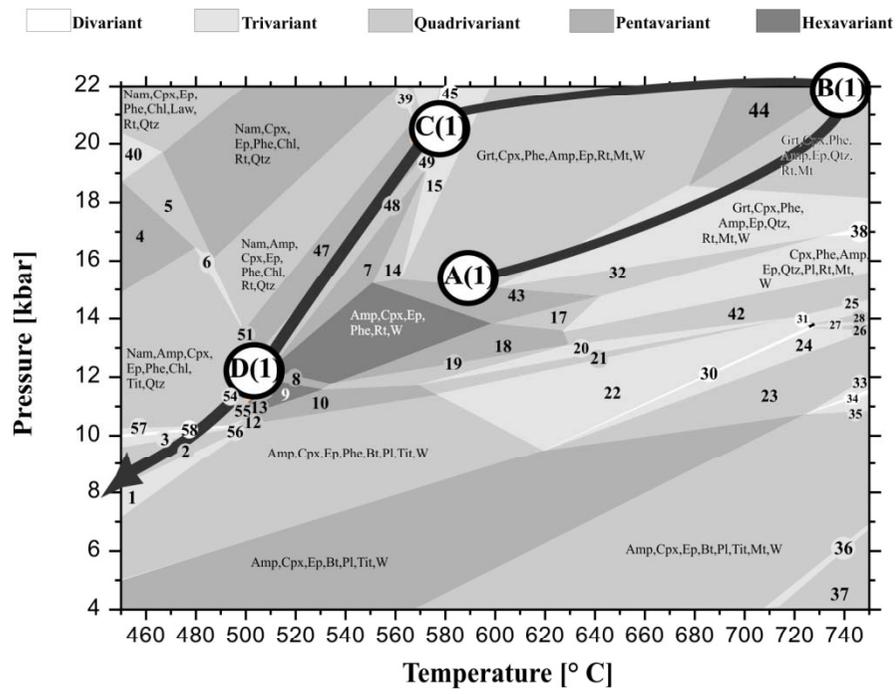
**Tso Morari, sédiments et basaltes du Permo-Trias :
éclogites et schistes bleus**



Tso Moriri : éclogites à coésite (+ diamant ?)



rétroréformées en faciès schistes bleus

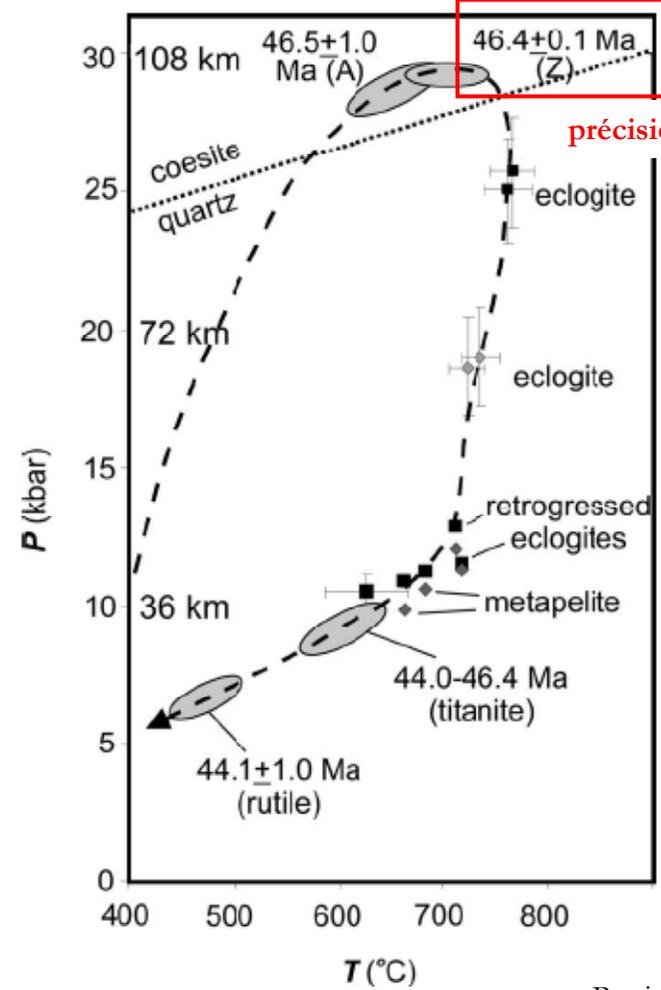


Des trajets P-Tp-t, de plus en plus précis

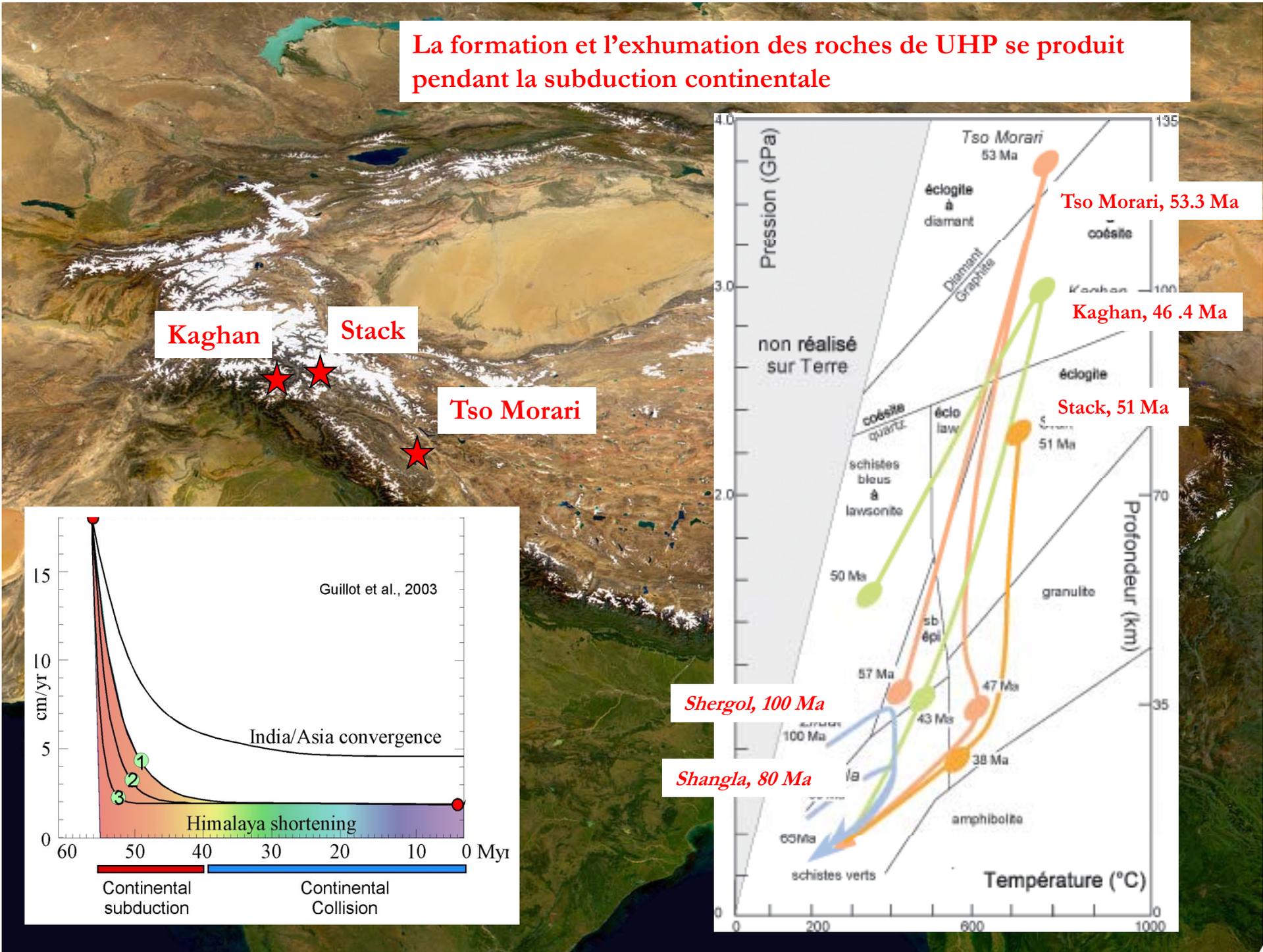
en combinant de nouveaux outils pétrologiques : calculs P-Tp multi-equilibres (pseudo-sections)...

... et de la thermochronologie moderne :
 U-Th-Pb, Sm-Nd, Lu-Hf : hautes tp
 Rb-Sr, Ar-Ar : tp intermédiaires
 FT et U-Th-He : basses tp

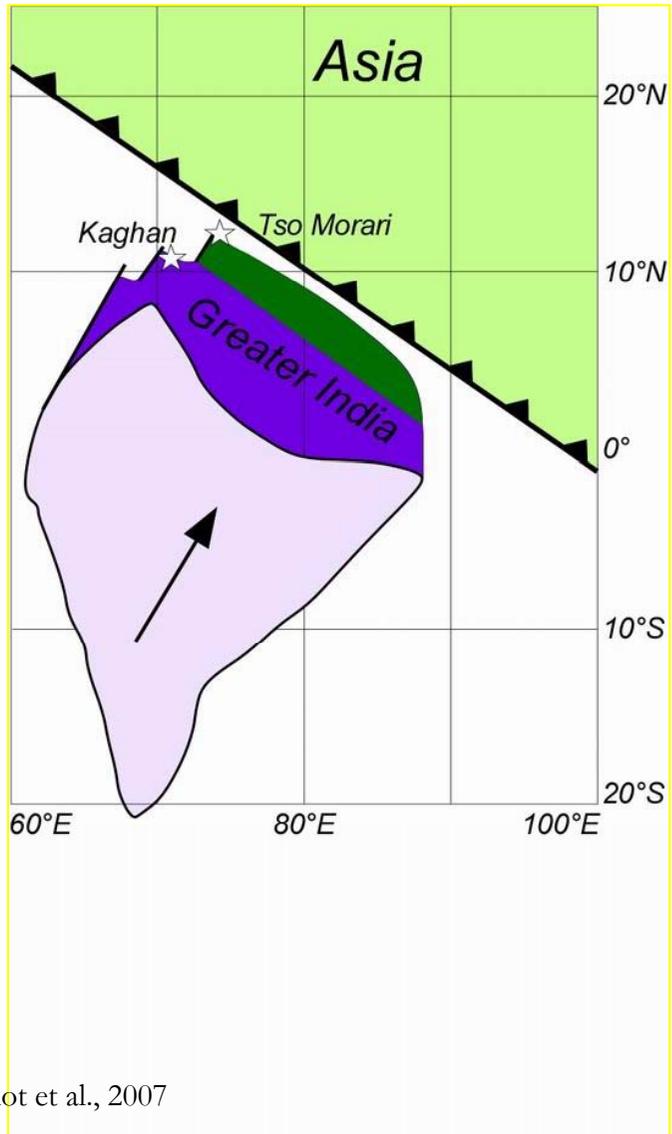
éclogites de Kaghan



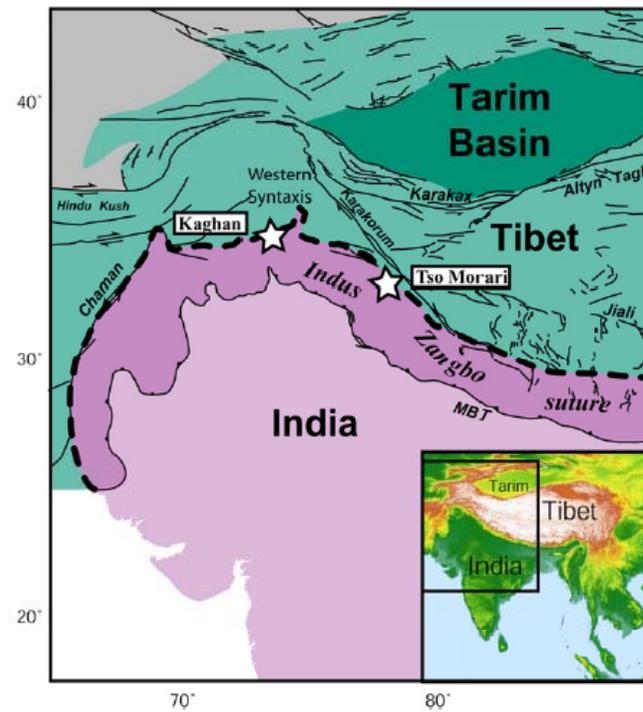
La formation et l'exhumation des roches de UHP se produit pendant la subduction continentale



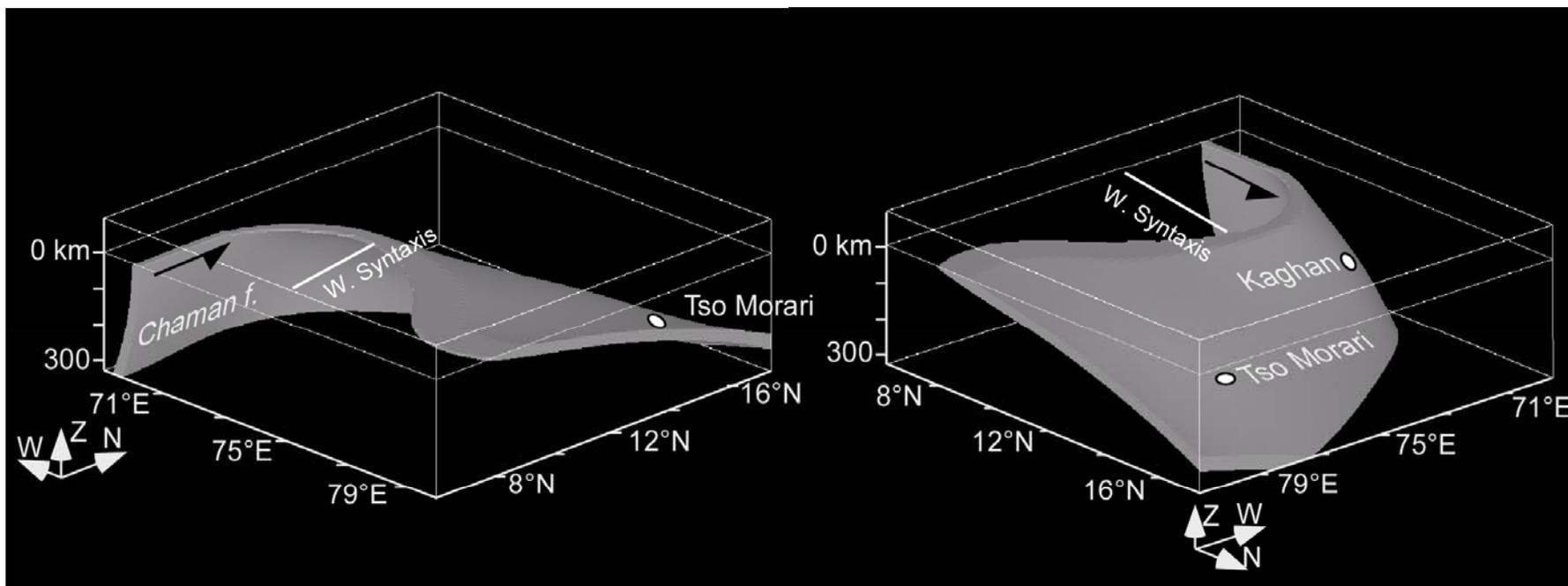
La formation des roches de UHP se produit à des ages différents :
un reflet de la paléogéographie de la marge indienne ?



Guillot et al., 2007

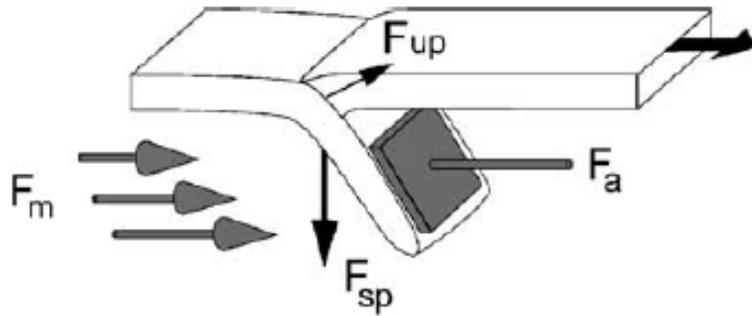


La géométrie de la marge NW de la Grande Inde au moment de la subduction continentale



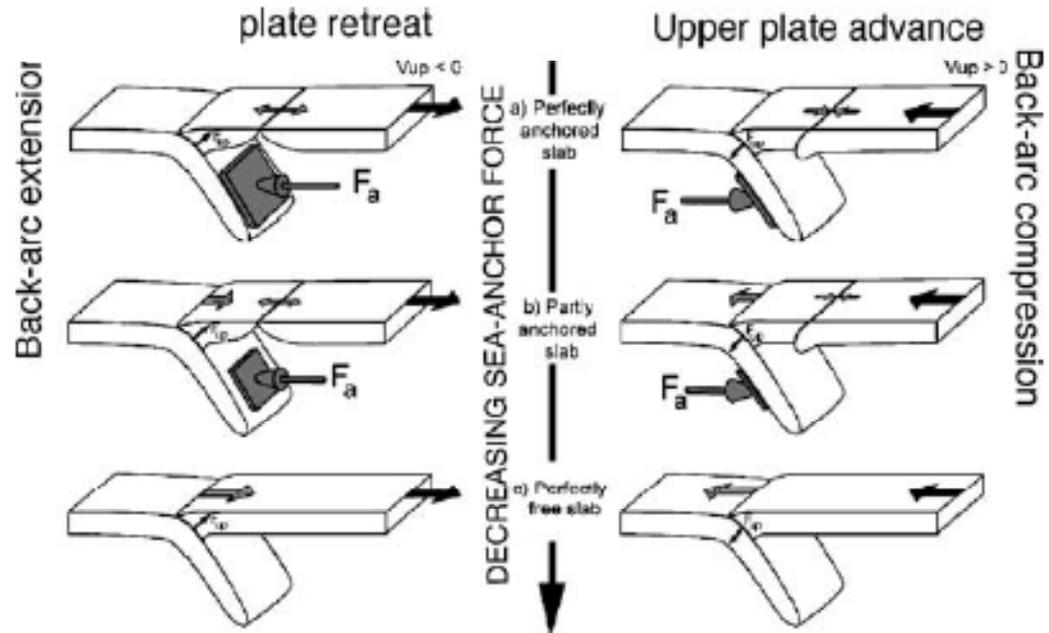
Guillot et al., 2007

Exhumer de roches HP et UHP ?



Deux régimes de subduction

F_m : flux mantellique
 F_a : force interplaques (*sea anchor*)
 F_{up} : force de succion de la plaque sup
 F_{sp} : force de traction (slab pull)



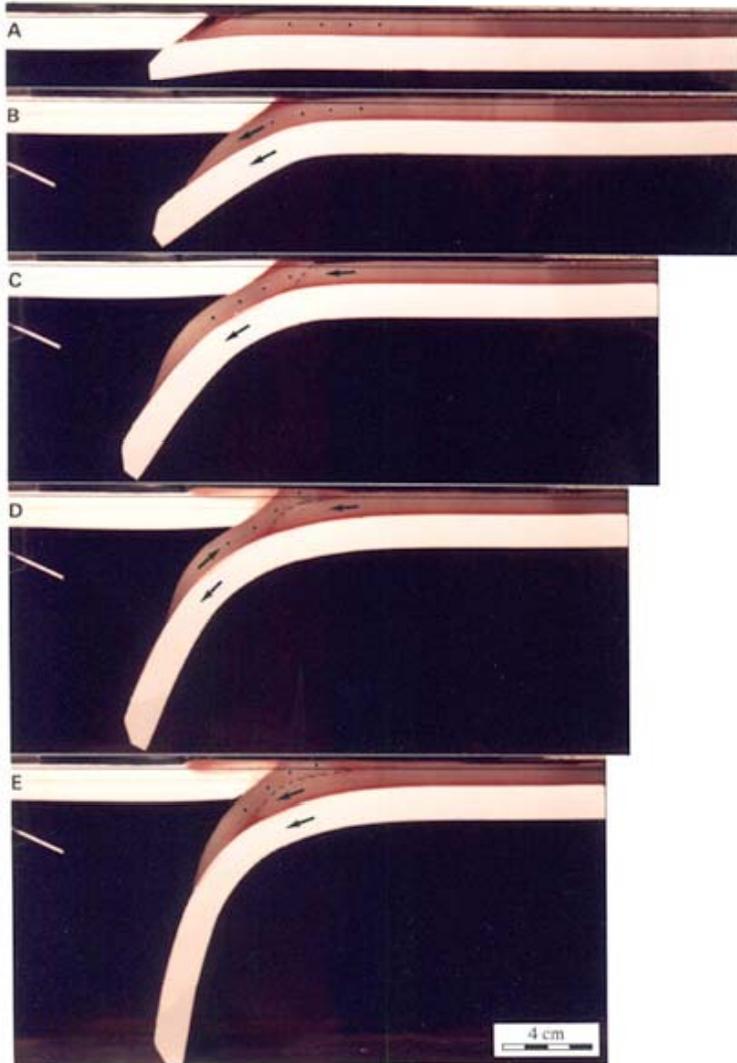
Régime extensif (plaque chevauchante en extension)

- $d(\text{slab}) > d(\text{asthénosphère})$
- $p \text{ interplaque } F_a > \text{slab pull } F_{sp}$

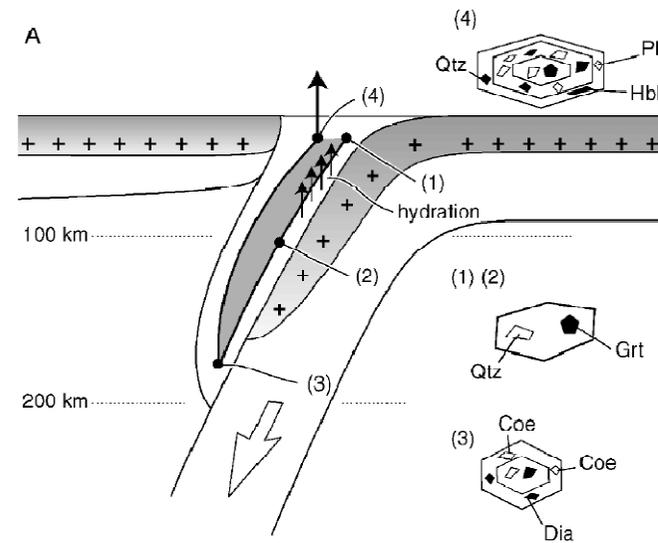
Régime compressif (plaque chevauchante en compression)

- $d(\text{slab}) < d(\text{asthénosphère})$
- $p \text{ interplaque } F_a > \text{slab pull } F_{sp}$

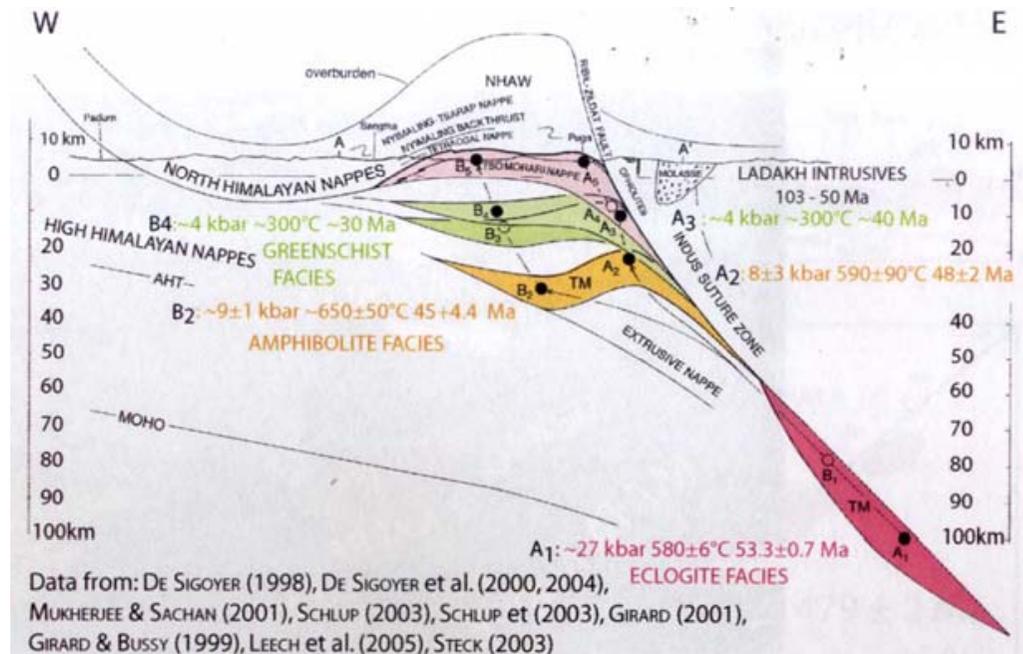
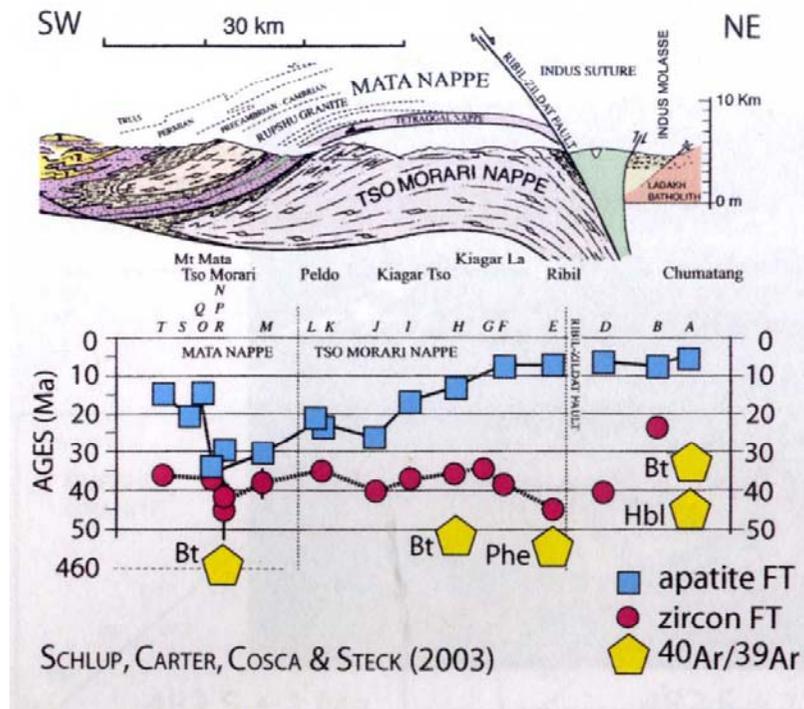
Exhumation en extension, contrôlée par la gravité, et facilitée par un chenal serpentineux ?



(Chemenda et al., 1995)



Exhumation en régime compressif : empilement (stacking) de nappes ?

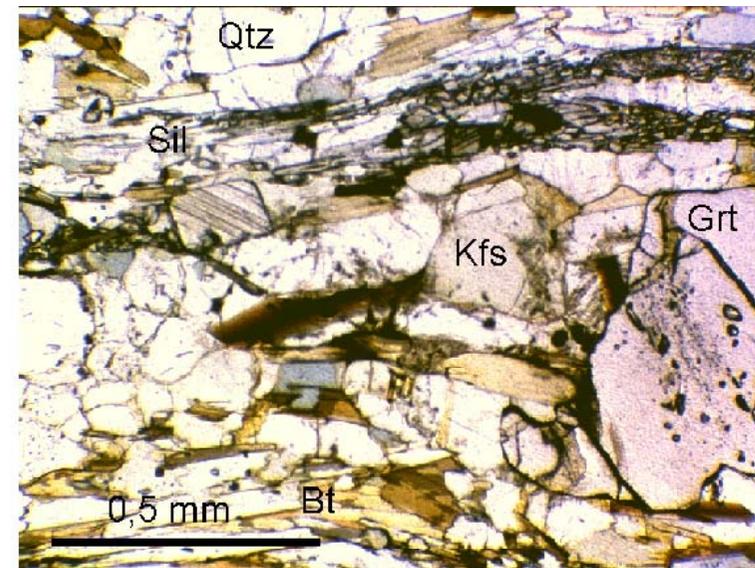
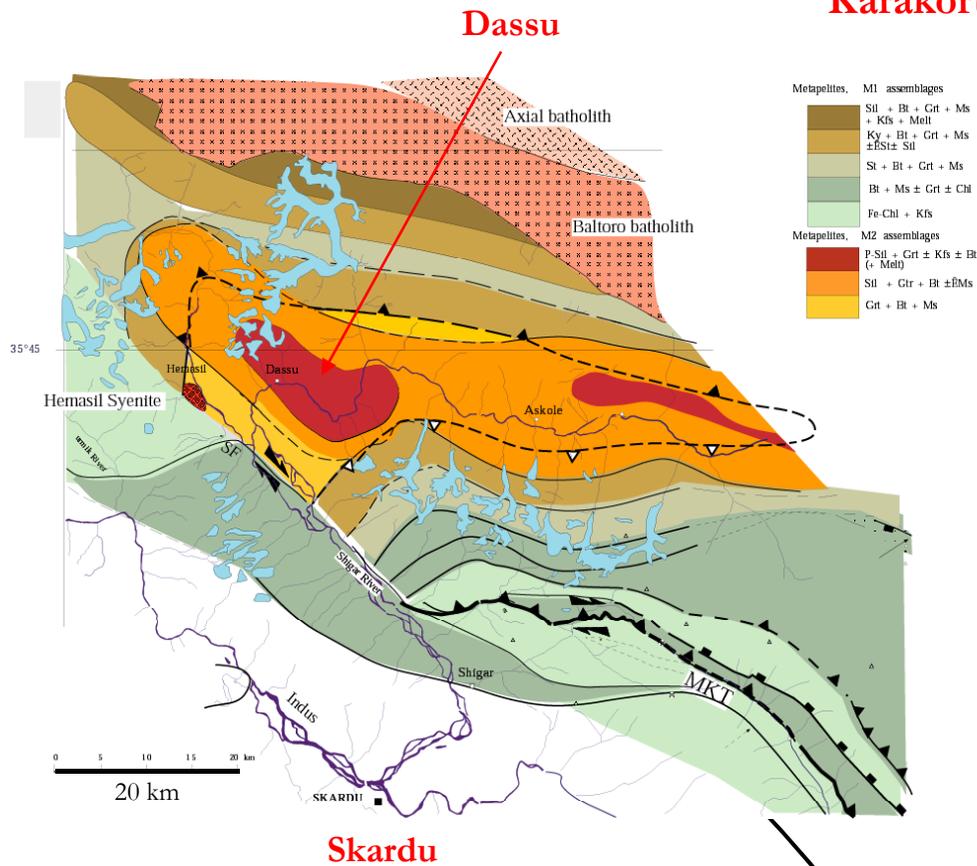


A l'opposé du UHP précoce, des dômes avec un métamorphisme tardif de très haute température



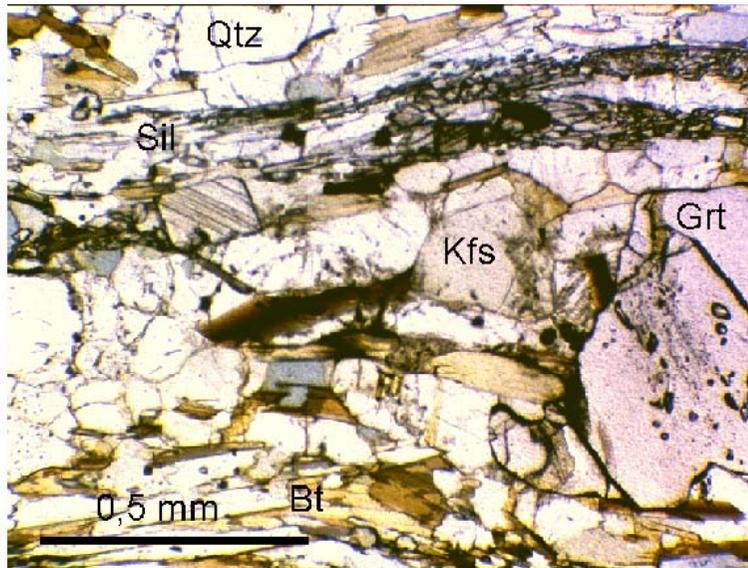
dôme de Panmah

Karakorum : métamorphisme dans la zone des dômes

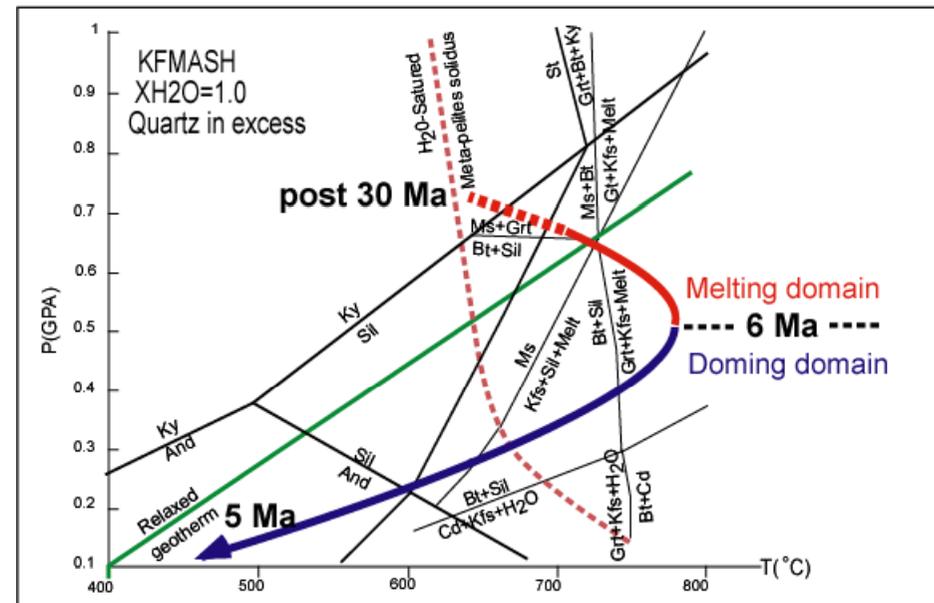


assemblage métamorphique Néogène

un métamorphisme très haute (ultra haute) température



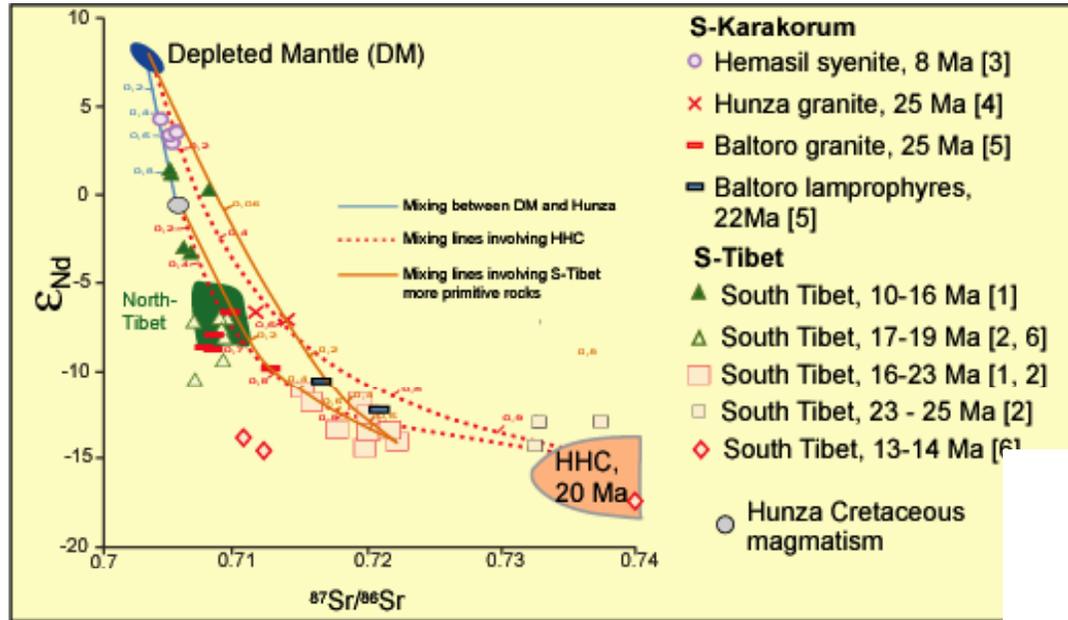
Chemin P-Tp-t, dômes du Karakorum



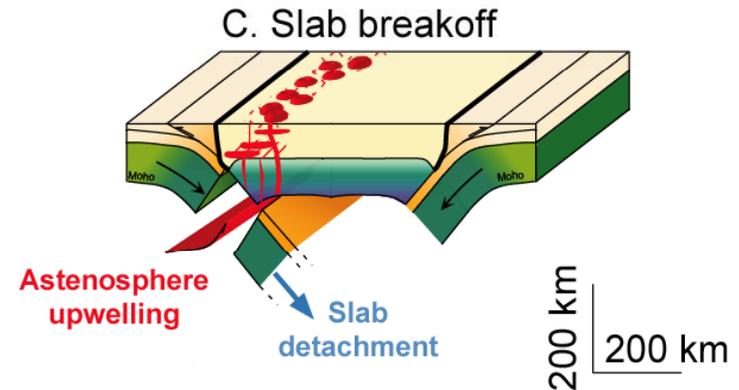
P-T-t path of the Karakorum Neogene gneisses

(Rolland et al., 2001)

Les dômes du Karakorum : une zone sous influence du manteau ?



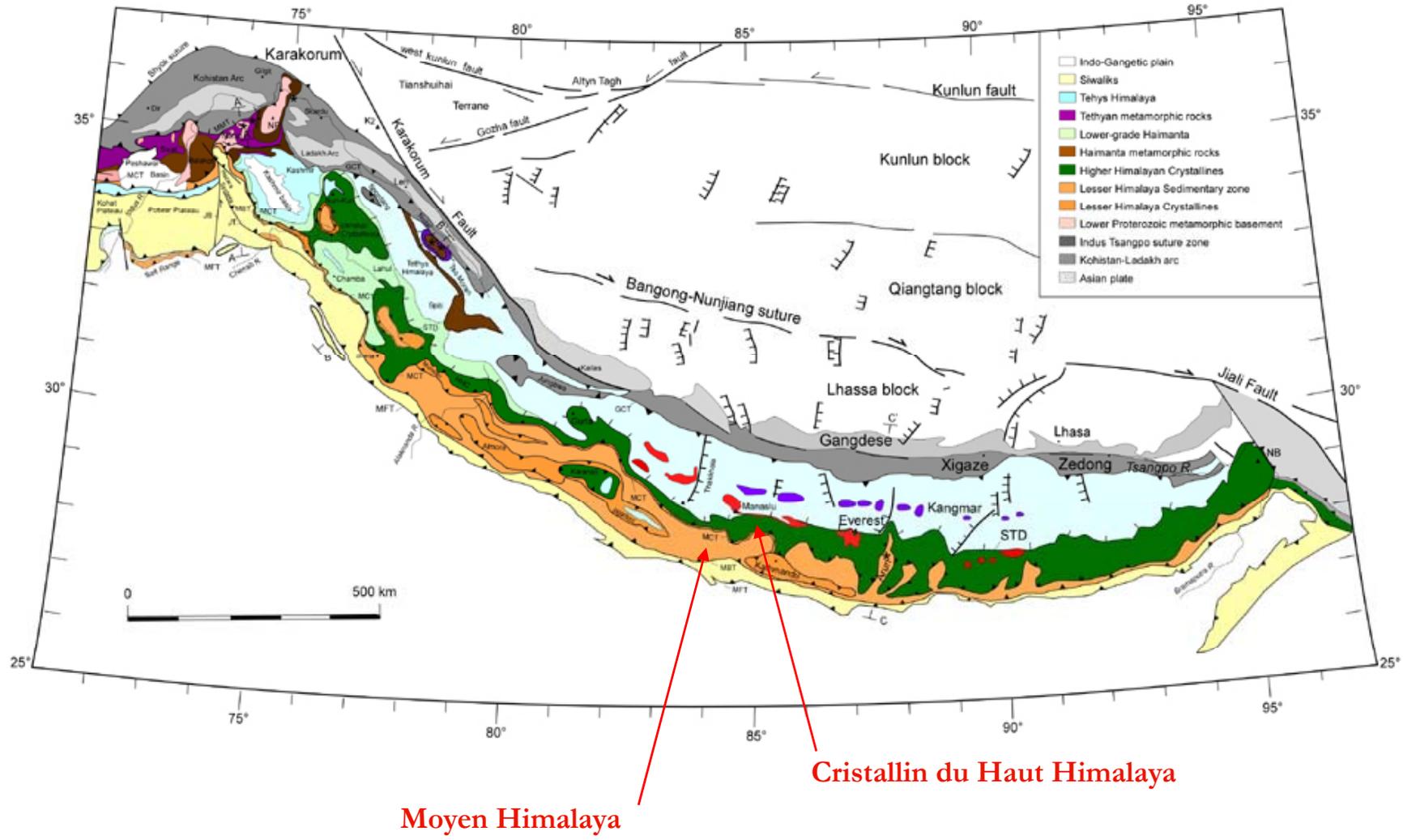
ϵ_{Nd} et $^{87}Sr/^{86}Sr$ des roches magmatiques du Karakorum S et du Tibet S



- ▨ Zones of migmatization
- ⊗ Surface location of magmatism

Impliquerait de la rupture de slab ?

L'épaissement crustal (Himalaya central)



Coupe métamorphique au Népal central
sommets du Cristallin du Haut Himalaya



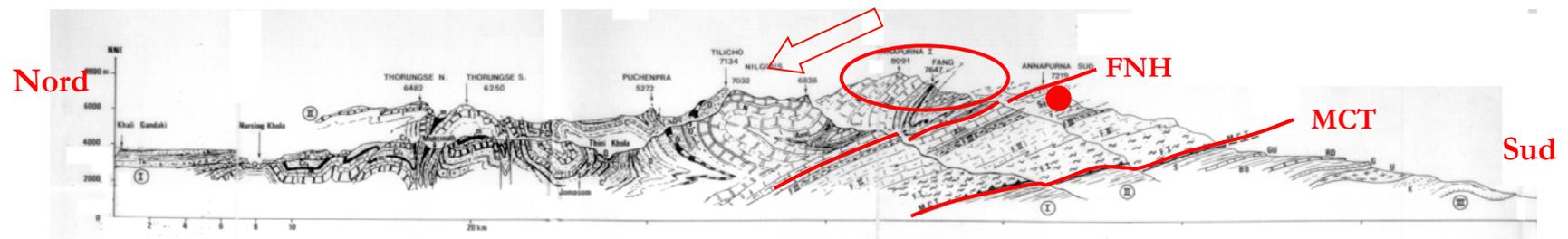
base du Sédimentaire (dio-bio)



FNH (C à sill)



sommets CHH : Ky rétro-morphosée en Sill



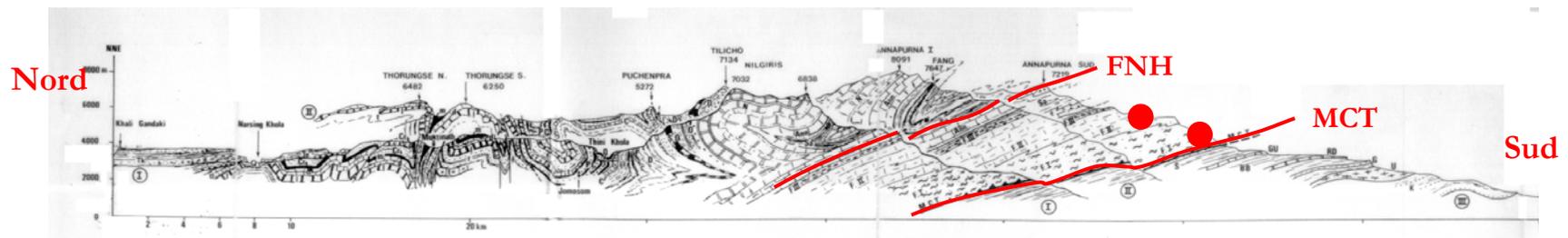
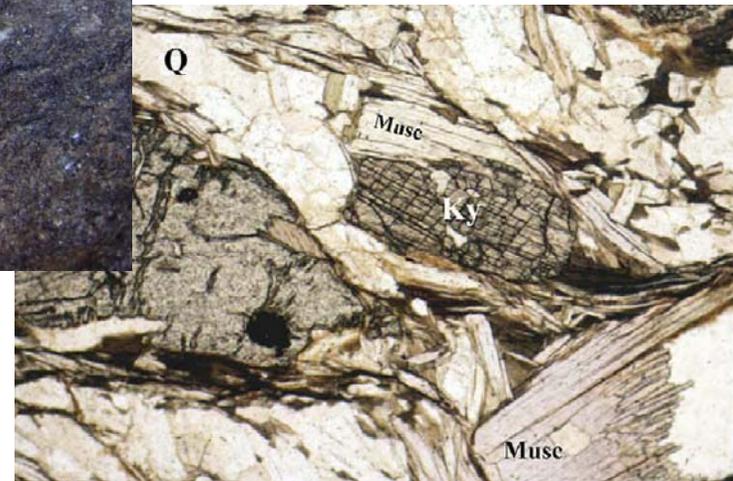


gneiss calcique
(Scp - FK - Dio - Hb - Bio)

Coupe métamorphique au Népal central
partie médiane du Cristallin du Haut Himalaya



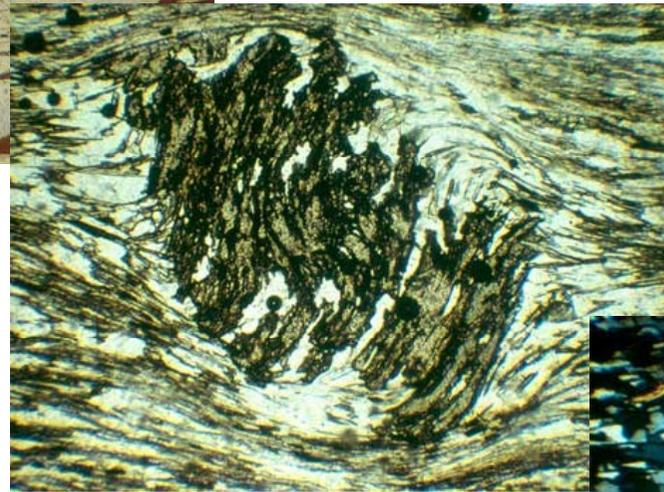
métapélite à $Ky \pm St$



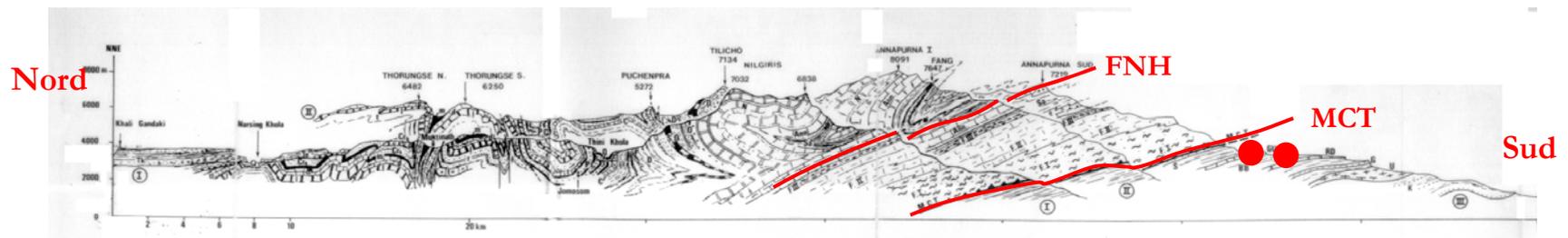
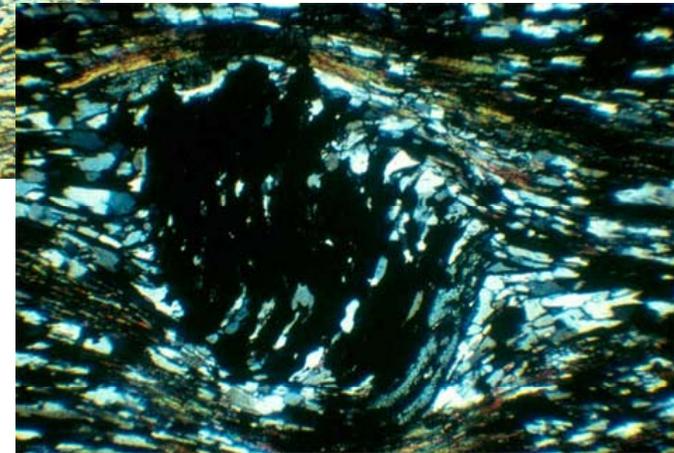


métapélite à St – Grt - Bio

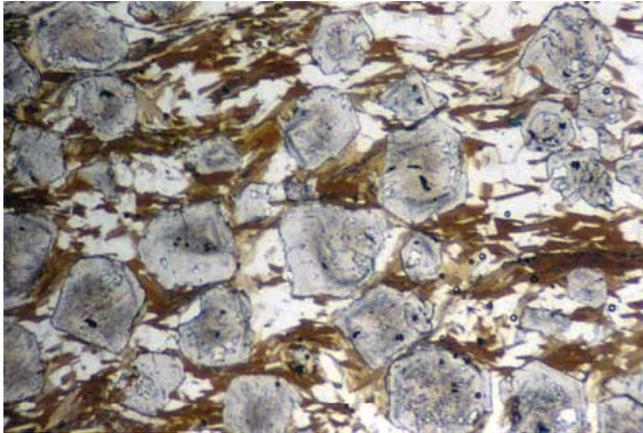
Une coupe métamorphique au Népal central
Base du HHC, sommet du MP



métapélite à Grt – Ctd synchronématiques

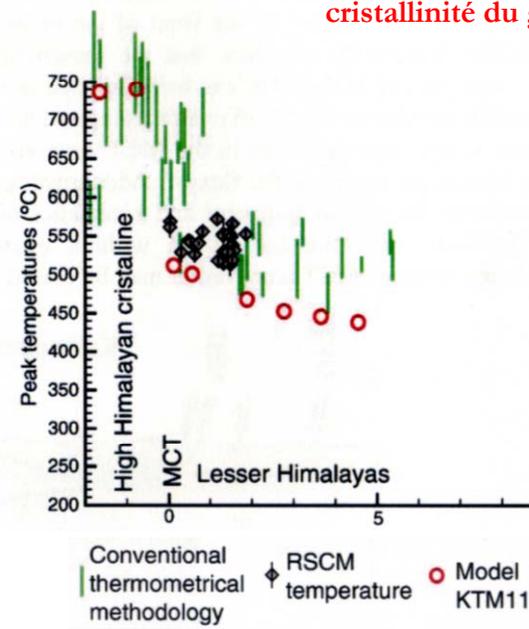


Coupe métamorphique au Népal central

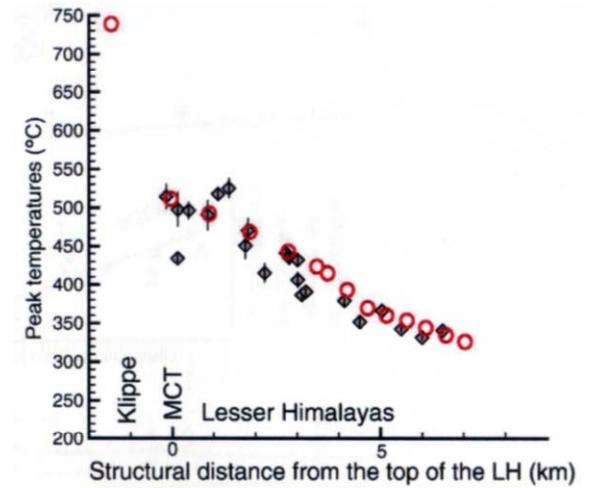


métapélite à Grt – Bio - Chl

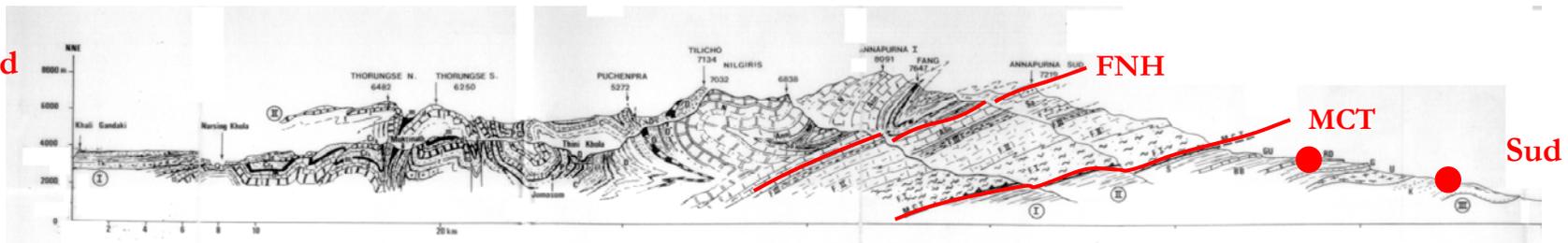
Bollinger, 2004



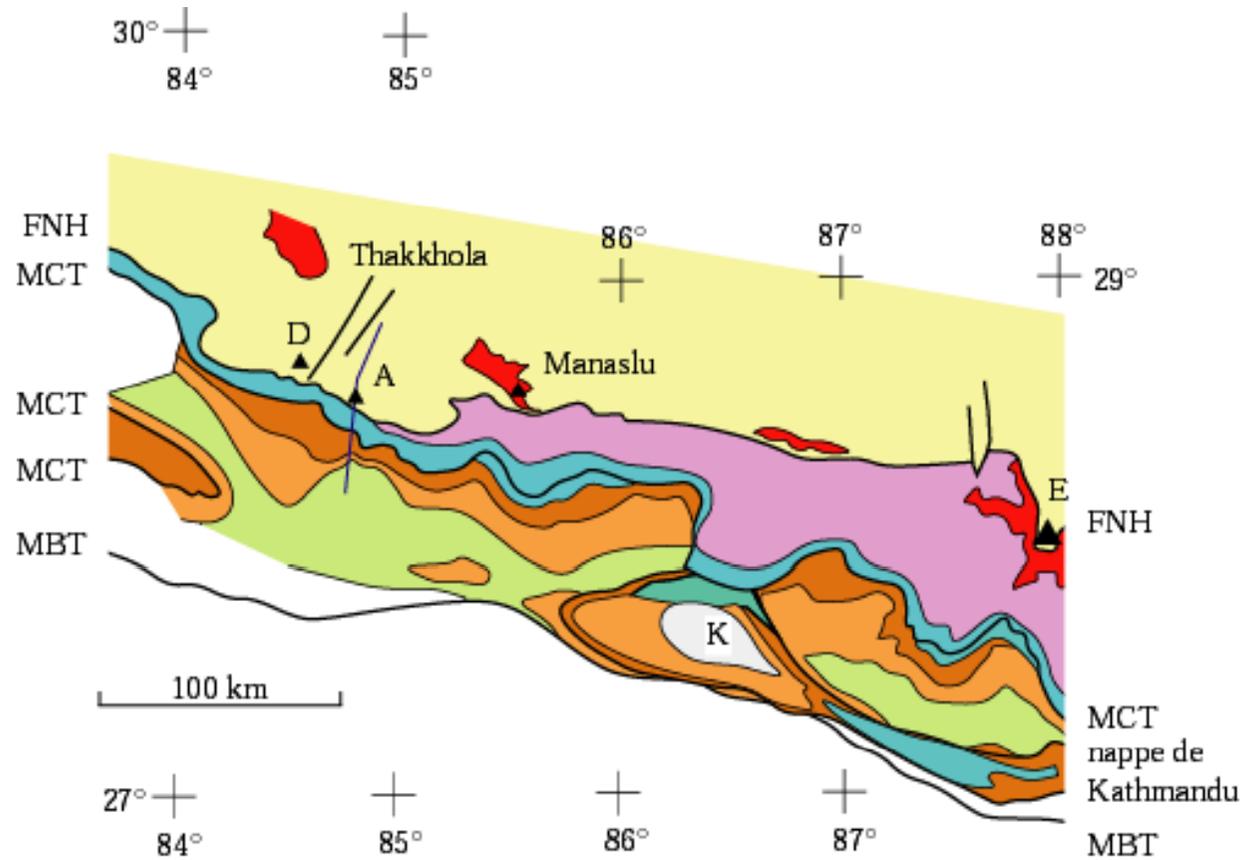
Au Sud, thermométrie complétée par les données sur la cristallinité du graphite



Nord

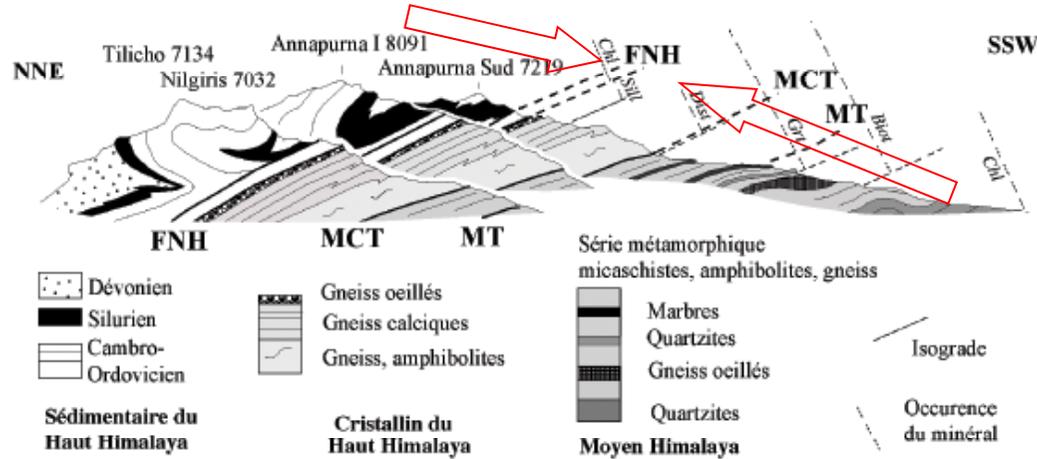


- Il faut prendre en compte dans les modèles explicatifs :
- des isogrades à peu près parallèles au MCT

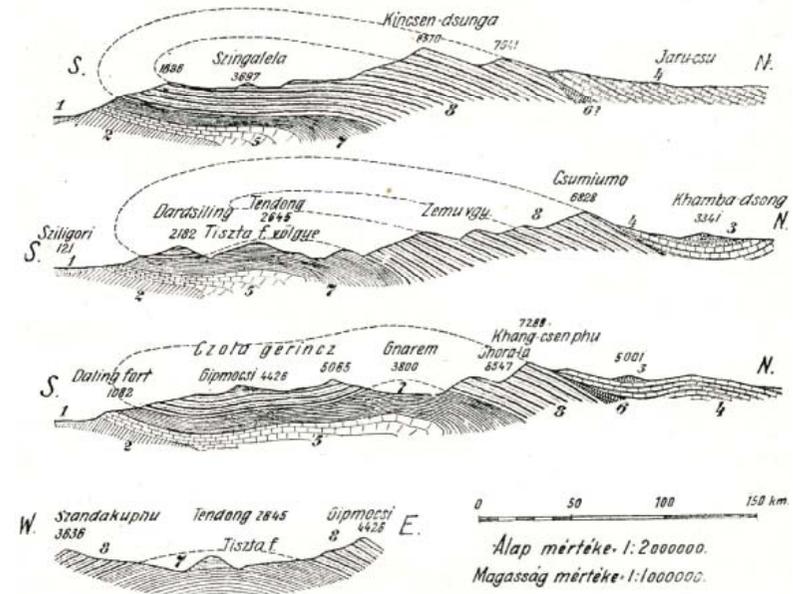


A prendre en compte dans les modèles explicatifs :

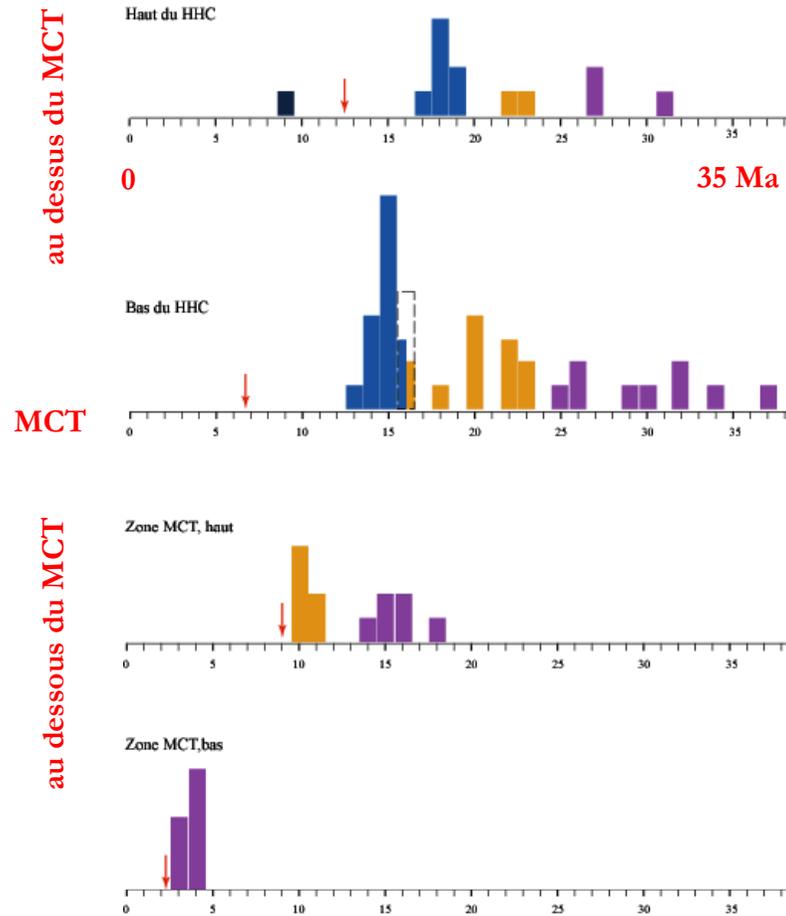
- des isogrades à peu près parallèles au MCT
- un métamorphisme inverse !



Au Sikkim : une première tentative d'interprétation par Von Loczi 1878.



- A prendre en compte dans les modèles explicatifs :
- des isogrades à peu près parallèles au MCT
 - un métamorphisme inverse !
 - rétrograde au dessus du MCT, prograde en dessous

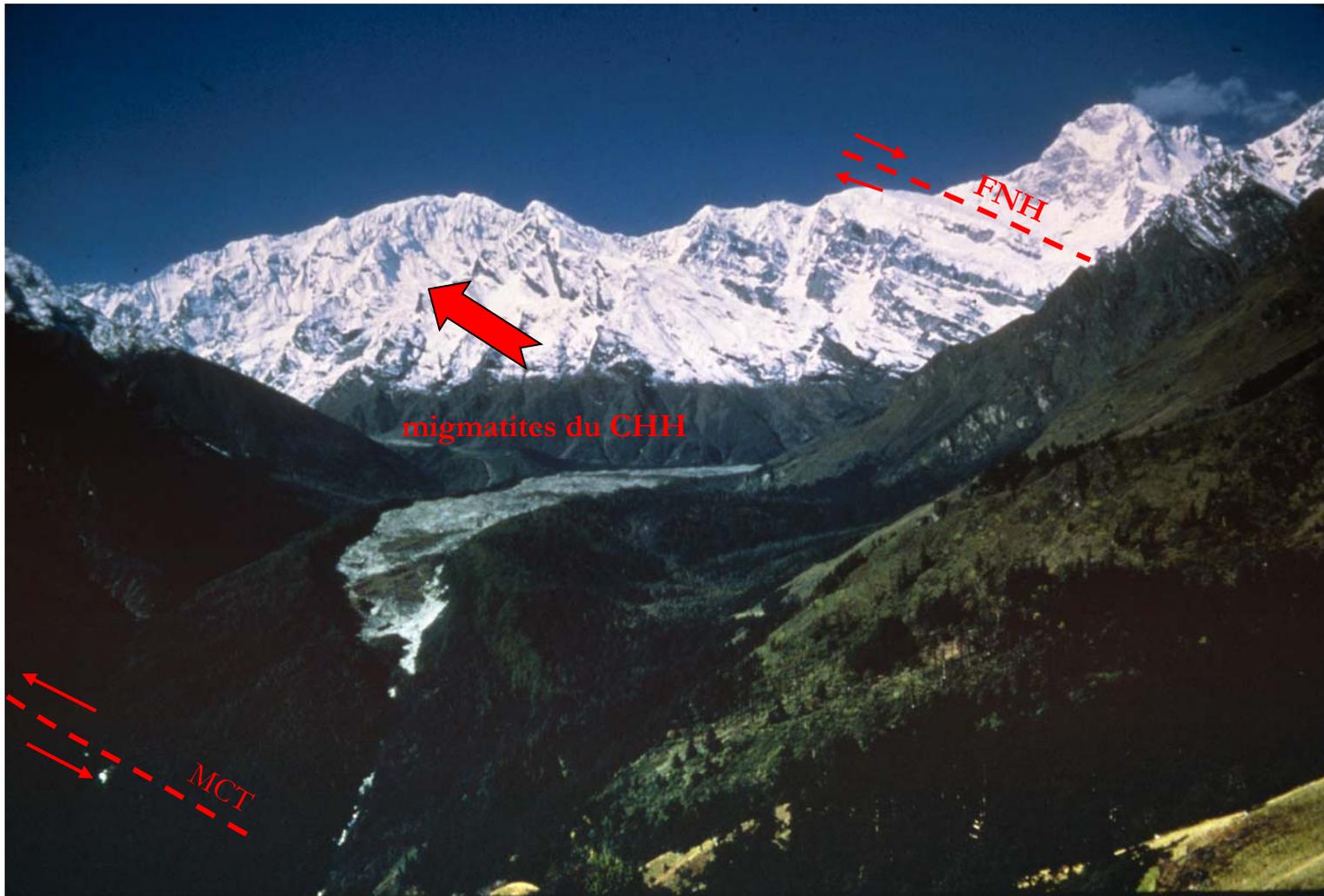


Langtang, monazites, données Khon et al., EPSL, 2004

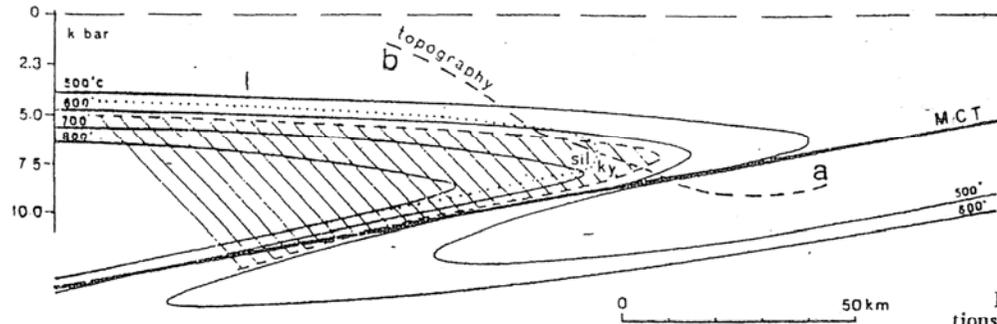
- prograde précoce (Th bas, Y variable) (mottled Y zoning)
- prograde tardif (Th bas, Y bas)
- refroidissement post anatexis (bordures riches en Y)
- altération

A prendre en compte dans les modèles explicatifs :

- des isogrades à peu près parallèles au MCT
- un métamorphisme inverse !
- rétrograde au dessus du MCT, prograde en dessous
- FNH et MCT à mouvements opposés (extrusion du CHH)



Métamorphisme inverse : le premier modèle (modèle du « fer à repasser »)

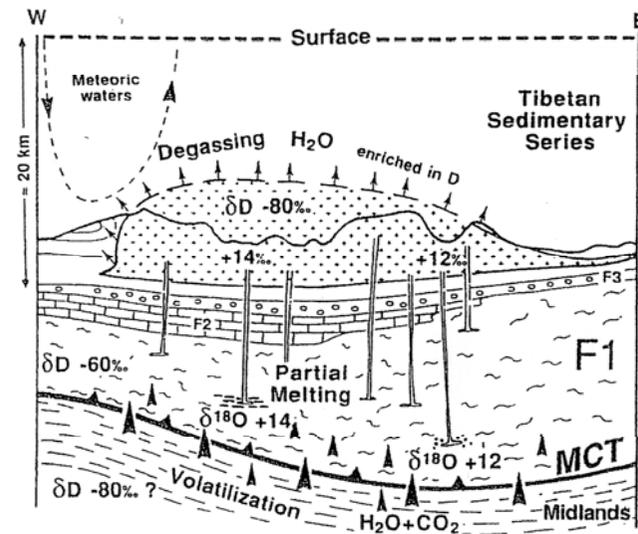


Le Fort, 1975

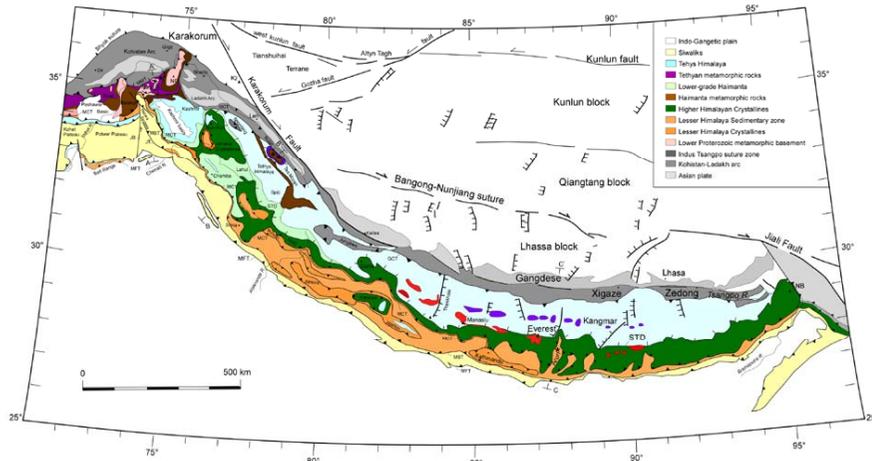
Fig. 10. Thermal regime of two thrust slabs, diagram based on field observations of the Main Central Thrust in Central Nepal. Temperature isograds are tentatively drawn together with the corresponding kyanite-sillimanite boundary and the muscovite granite excess water solidus of figure 11. Heat transfer by magma and water movements is not taken into account. The present topographical surface is also indicated (a-b). See text for details.

La formation des granites du Haut Himalaya, conséquence indirecte du MCT

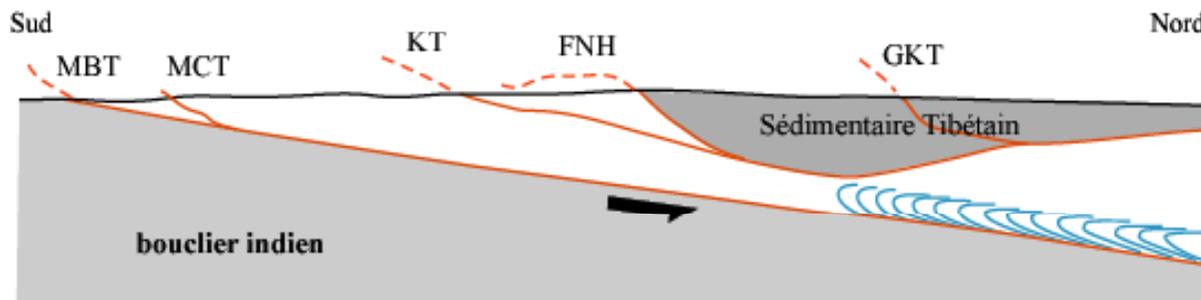
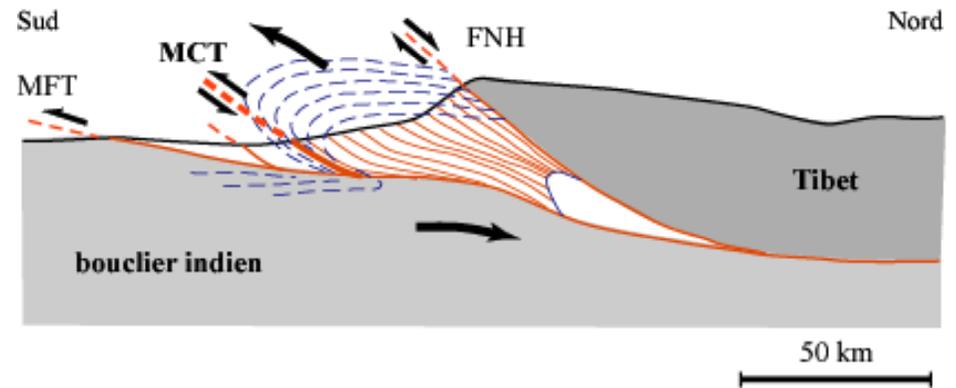
Figure 9 Schematic time-integrated model for the genesis of the Manaslu granite, showing the proposed transfer of aqueous fluids and magmas among the different crustal levels (after France-Lanord *et al.* 1988); partial melting in the hot Formation I was probably triggered by the infiltration of fluids ($H_2O + CO_2$) from the volatilisation of the Midlands metasediments underlying the MCT; numerous batches of magma were emplaced at the interface between the Tibetan Sedimentary Series and the metamorphosed Tibetan Slab; O-isotope variations (and Sr- and Nd-isotope ratios) in the quartzo-pelitic metasediments of Formation I were preserved during emplacement and crystallisation of the magmas; δD values of the granites reflect modification of the initial Formation I values by the infiltrating fluids and degassing of the magma; Meteoric-hydrothermal systems were probably active in the now-eroded Tibetan Sedimentary Series, but interaction with the granite was extremely local; note that because the section shows the granite at its maximum thickness, the relationship between the volume of the partial melting zone and that of the pluton cannot be represented.



Entre MCT et FNH, l'extrusion (l'écoulement) de la croûte moyenne



du « corner-flow » ?



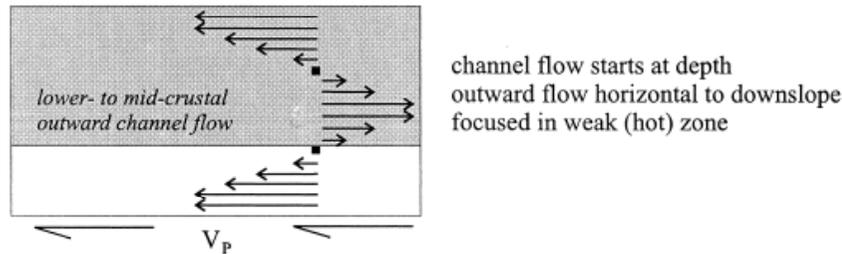
du « channel-flow » ?

le modèle actuellement en vogue :
le « channel flow »

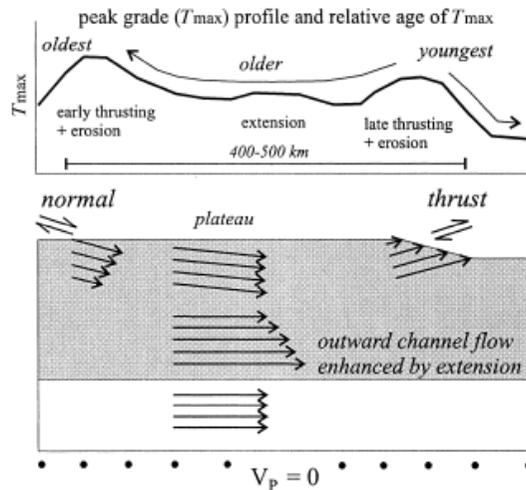
croûte moyenne très ductile :
écoulement horizontal facile

Les bases du channel-flow
(Jamieson et al., 2002)

(a): Initiation of outward channel flow in mid-crust

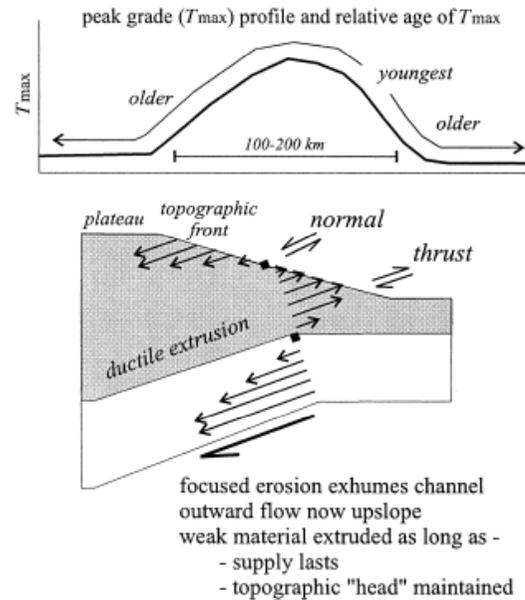


(b): Exhumation by post-convergent extension / contraction



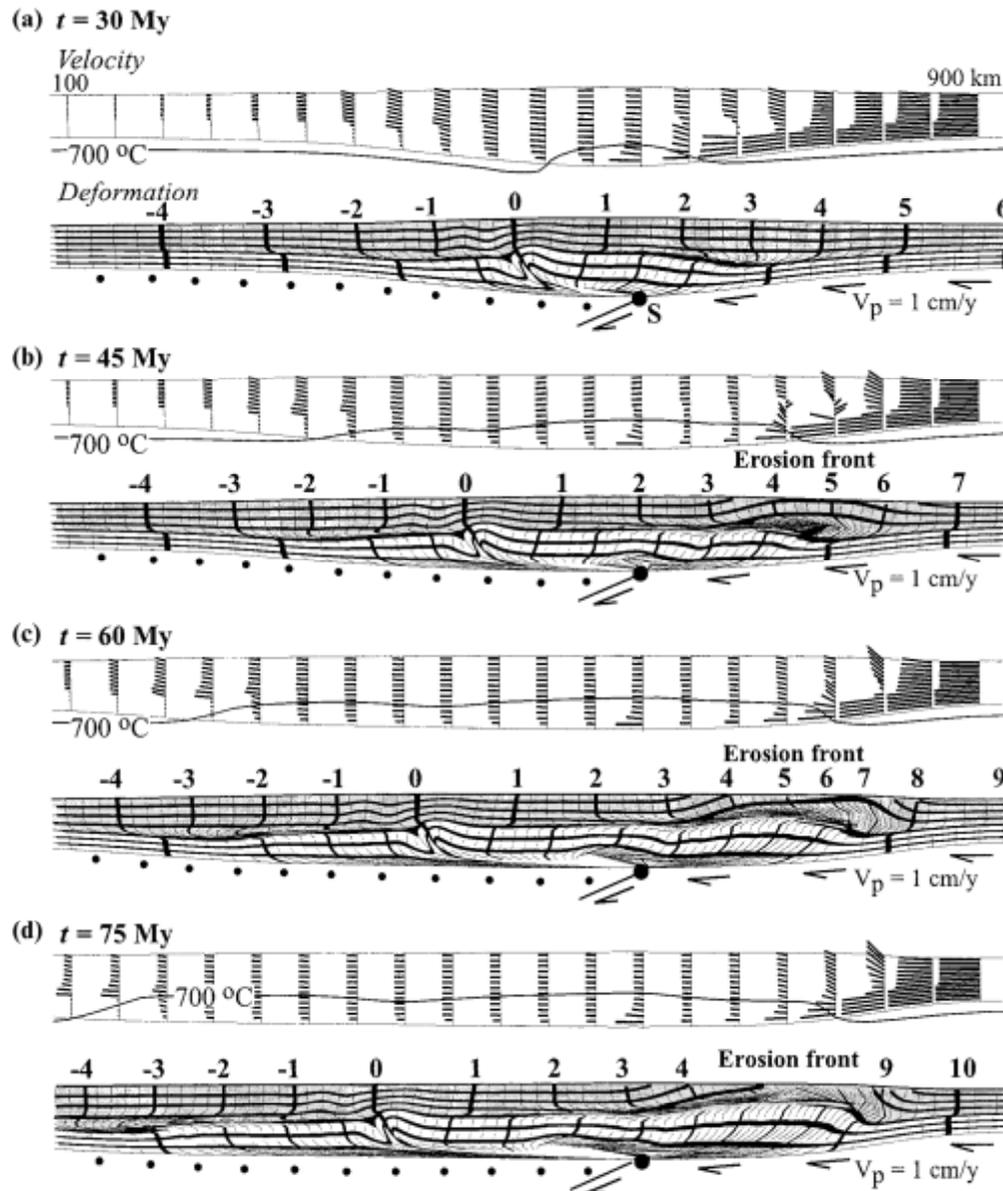
extension driven by gravitational potential energy gradient
extension drives contraction and thrusting on margin
channel not exhumed

(c): Exhumation by syn-convergent erosion



s'il y a une différence de topographie, l'érosion permet (et maintient) l'arrivée du chenal d'écoulement en surface (→ extrusion des roches de la croûte moyenne/basse)

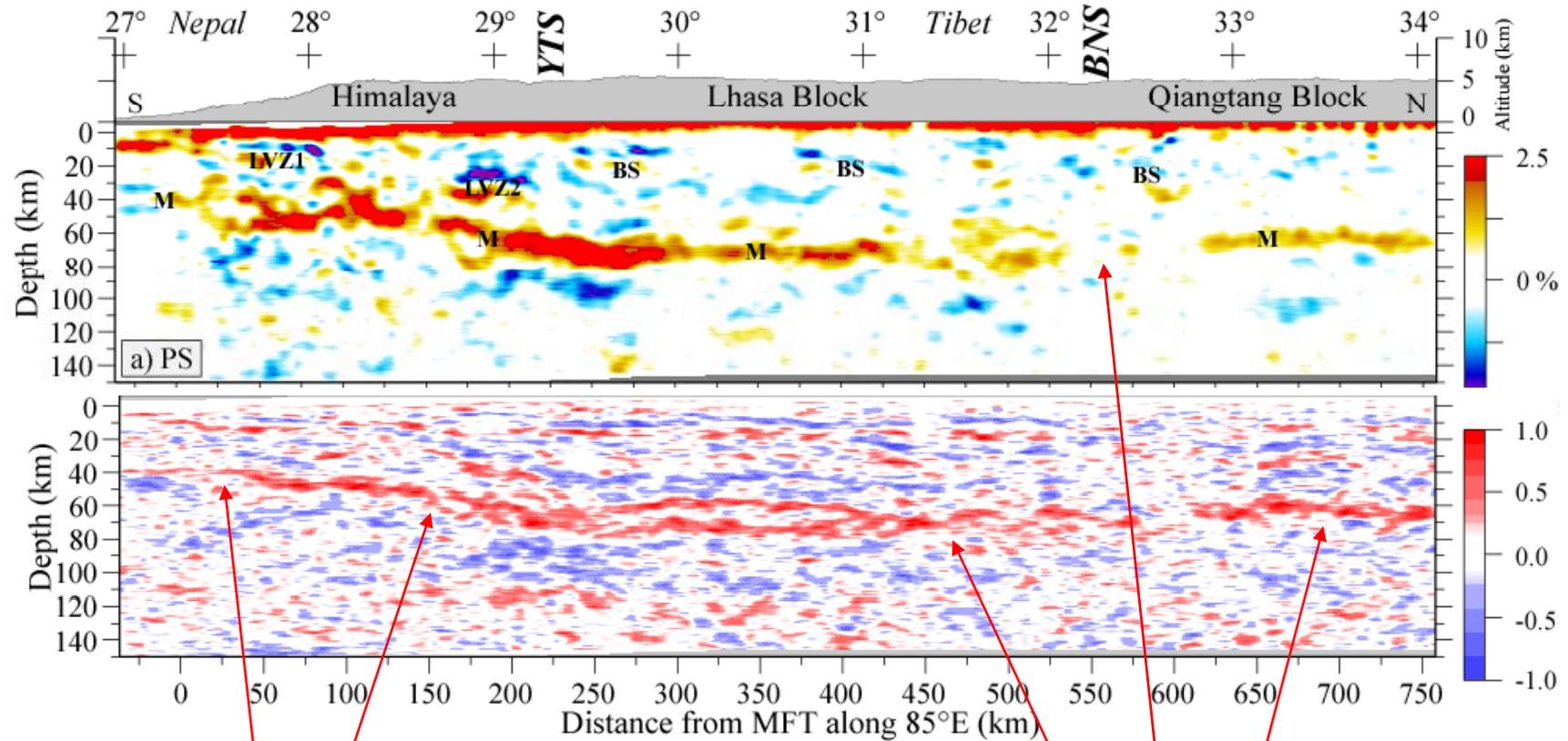
HT-6: Interaction between Extrusion/Channel Flow and Surface Erosion



le channel-flow : un modèle testé (validé ?) numériquement

Effect of focused erosion on development and exhumation of the mid-crustal channel flow zone. On the pro-side, the reversal in the mid-crustal velocity field associated with channel flow is apparent by comparing 30 Myr (a) and 45 Myr (b). On the retro-side, outward channel flow and convergence act in the same direction, so that the retro-ward flow reaches a maximum in the mid-crustal channel. Thickening at the top of the pro-side channel is evident from both the deformed grids and the velocity fields at 45 and 60 Myr; the channel develops a 'pip' shape during exhumation in response to removal of overlying material.

Un modèle qui s'appuie sur l'imagerie sismique de la croûte (par exemple le profil Hi-Climb)

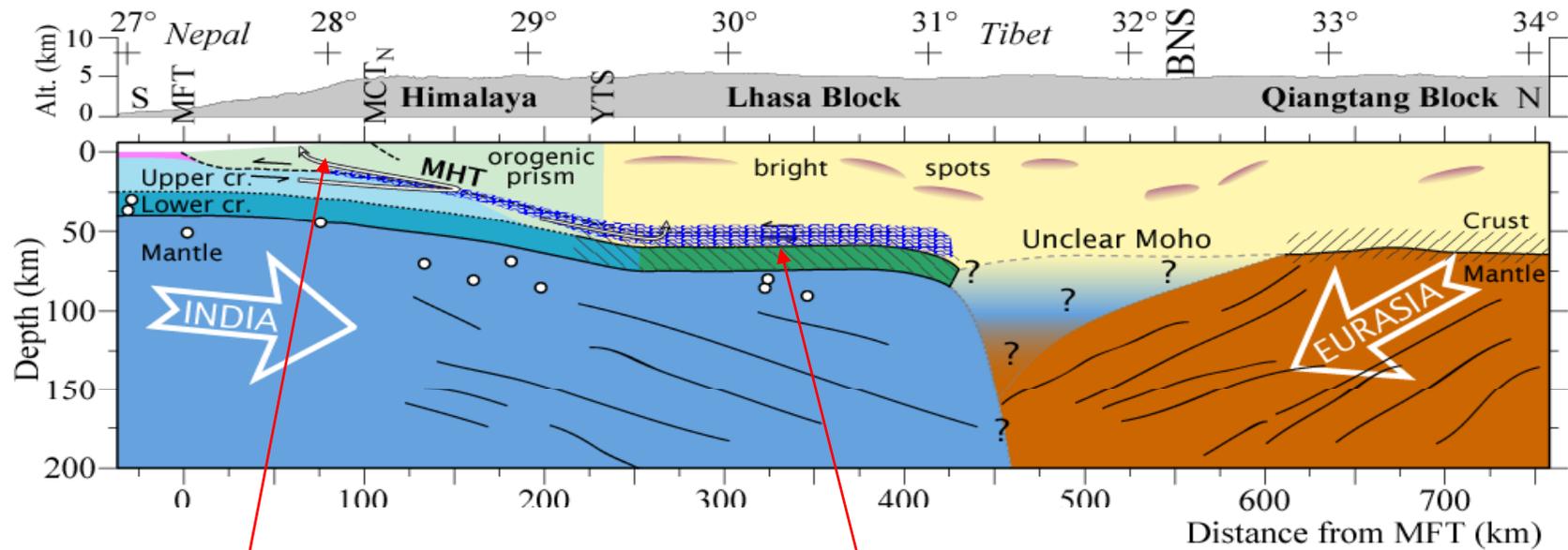


- Moho très clair sous le Népal à ~40 km
- Il plonge régulièrement vers le N sous le Ht-Himalaya et la suture du Tsang Po jusqu'à ~75 km

- Moho quasiment horizontal (~75 km) sous le bloc de Lhasa
- Moins visible sous la suture de Banggong
- Légèrement moins profond sous le bloc du Qiangtang (~65 km)

L'interprétation du profil Hi-Climb : une coupe Himalaya – Tibet Sud

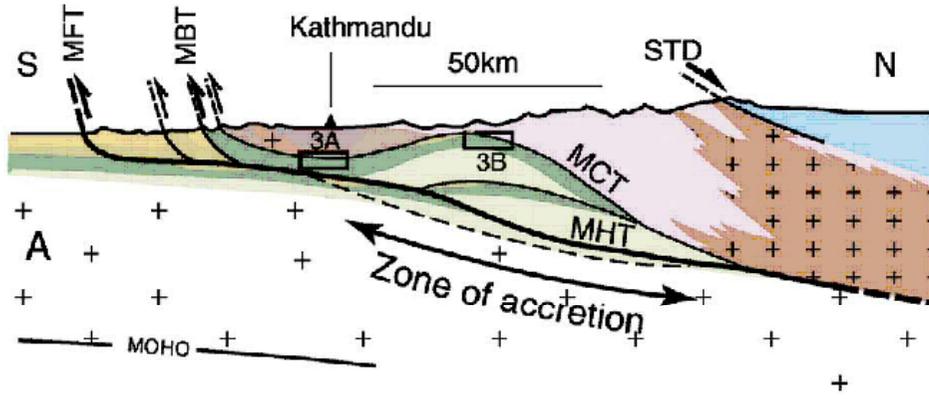
Le CHH : du matériel tibétain ...



Exhumation au front topographique

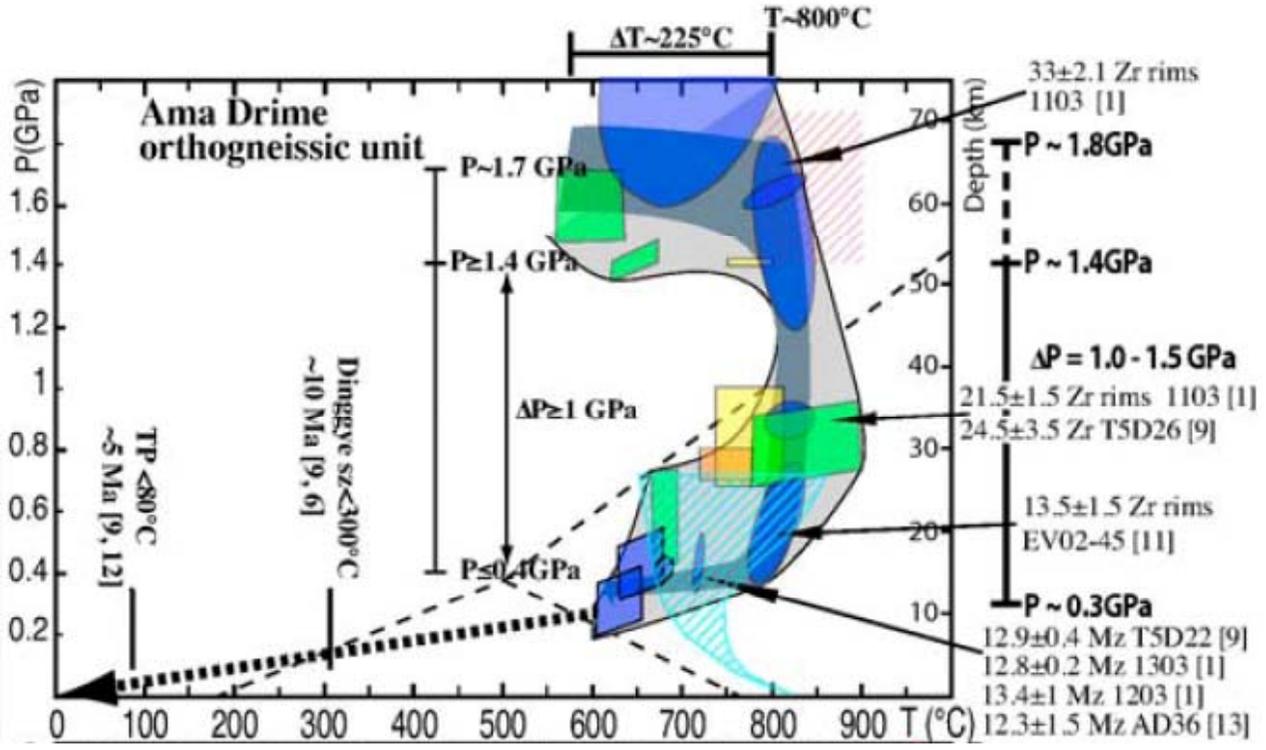
Écoulement dans la croûte moyenne, sous le Tibet épais

Certains éléments difficiles à concilier avec le channel – flow ou le corner – flow ...



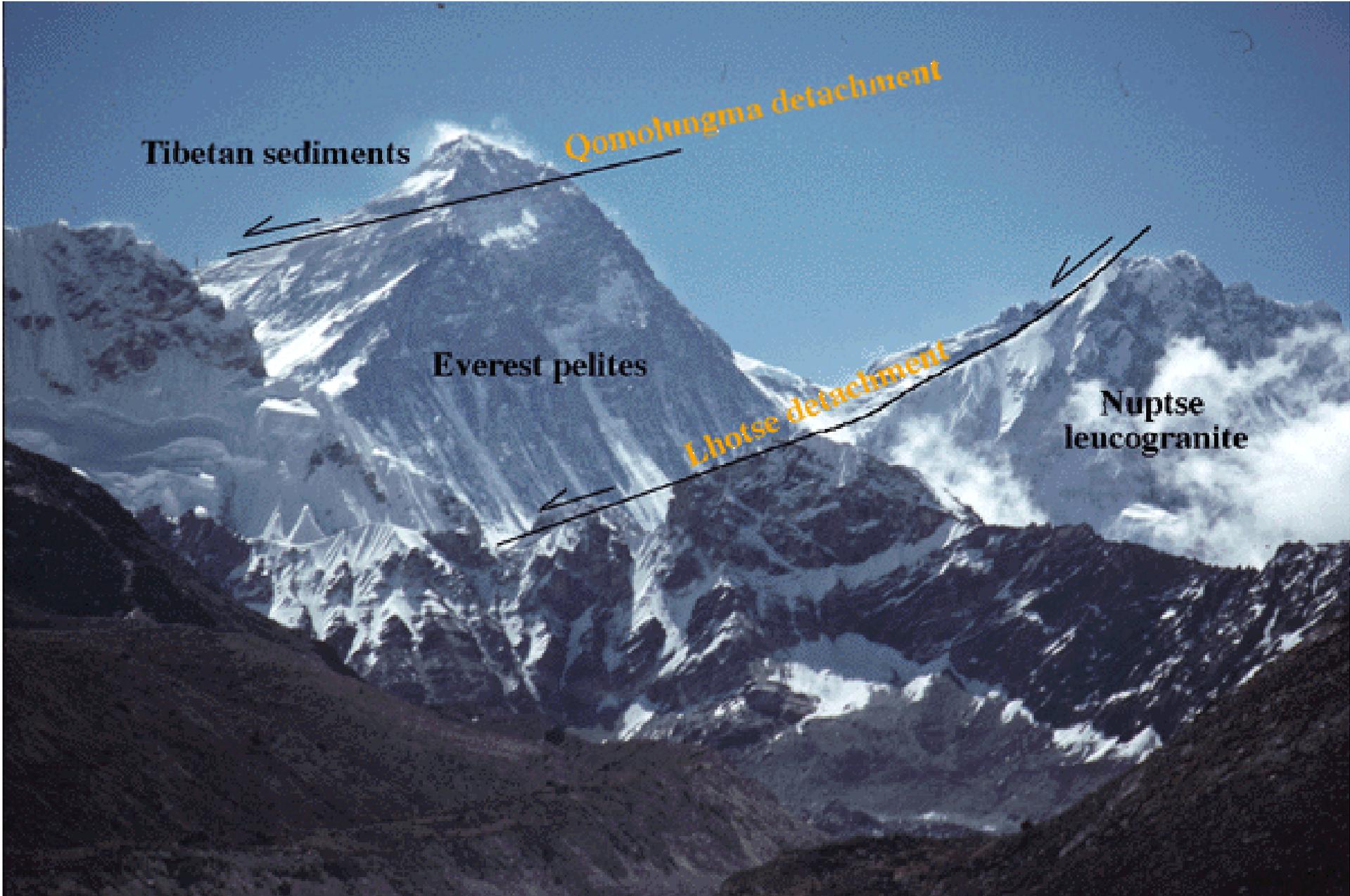
nappes du Moyen Himalaya

roches HP dans le CHH



Kali et al. (2010)





Tibetan sediments

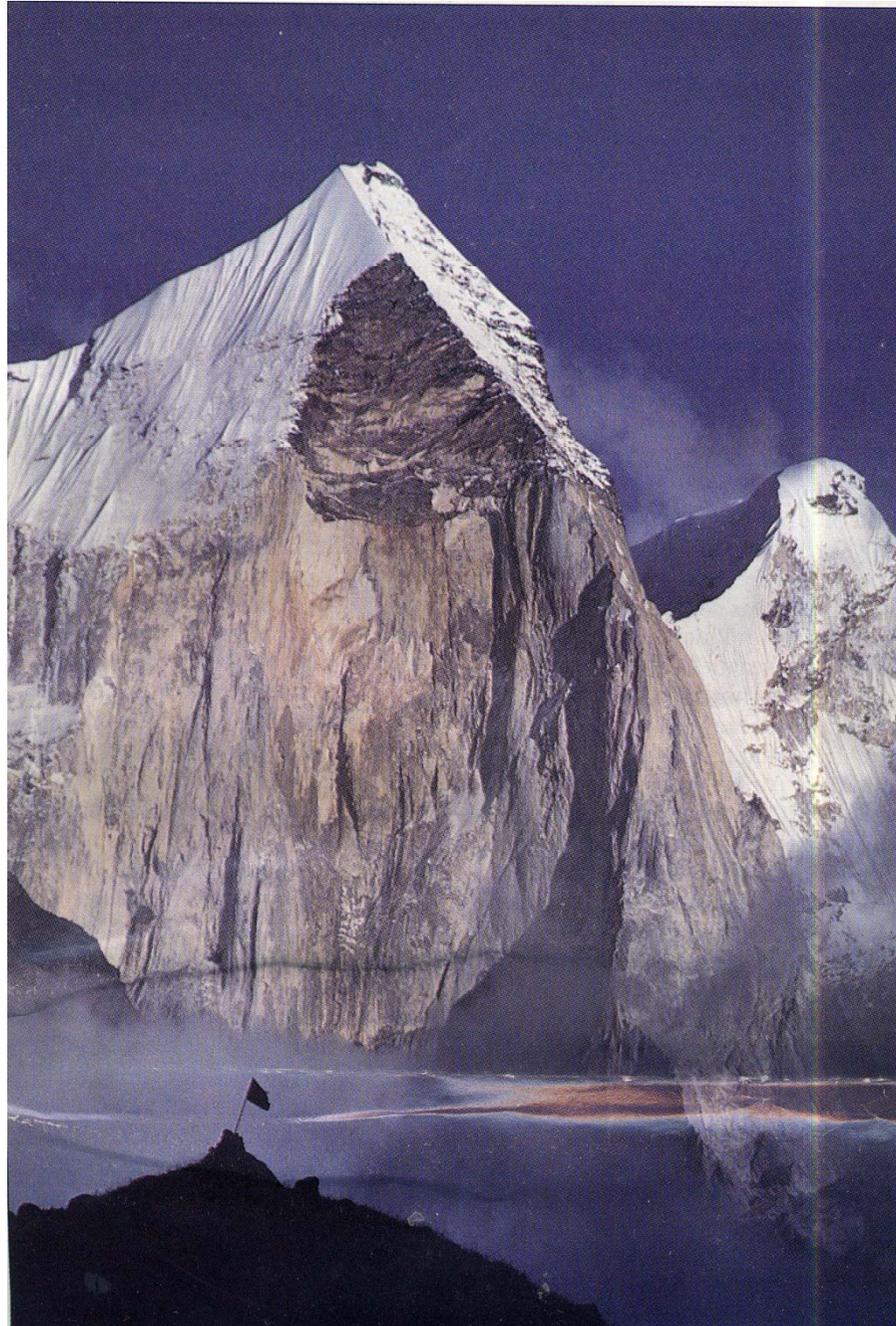
Qomolungma detachment

Everest pelites

Lhotse detachment

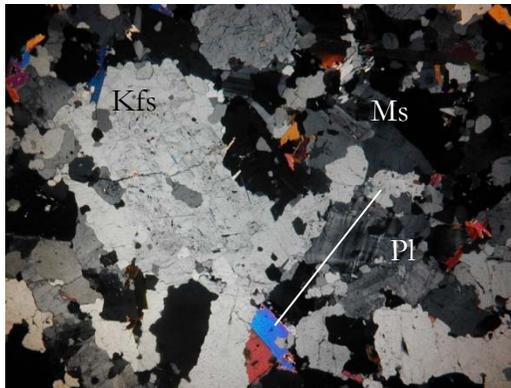
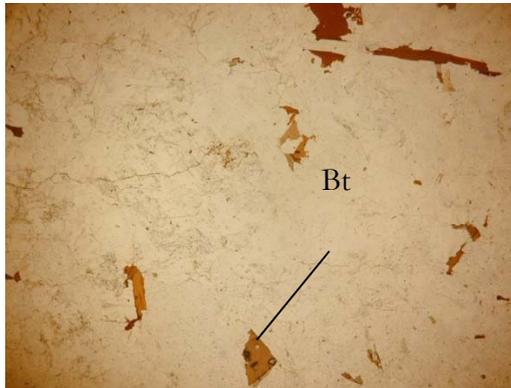
Nuptse
leucogranite

Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

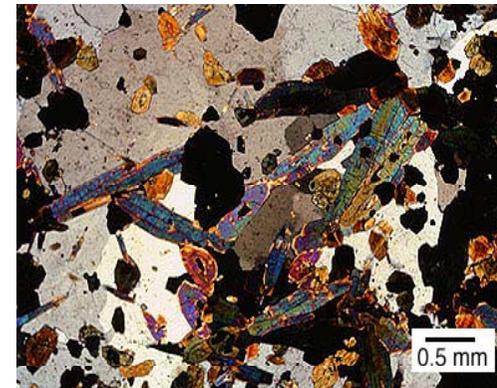
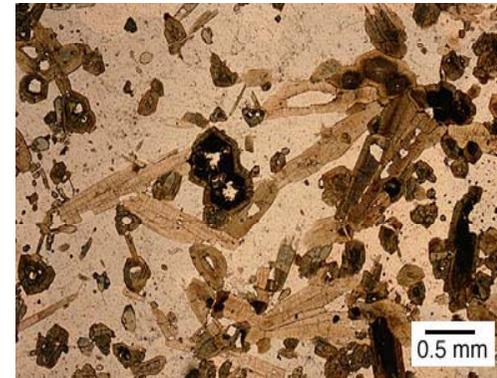


Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Pétrologie des leucogranites himalayens



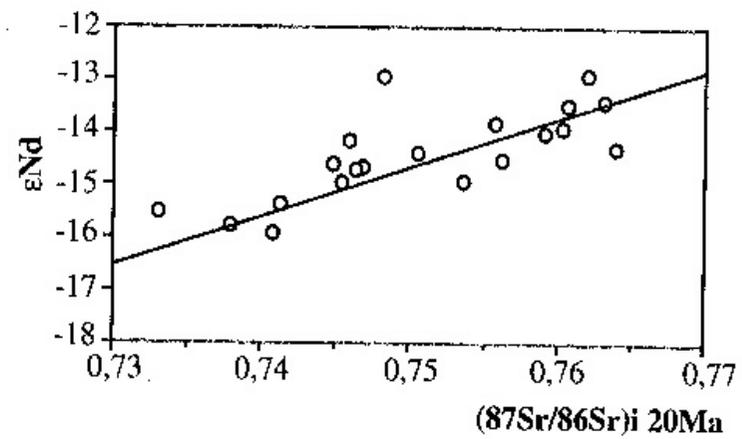
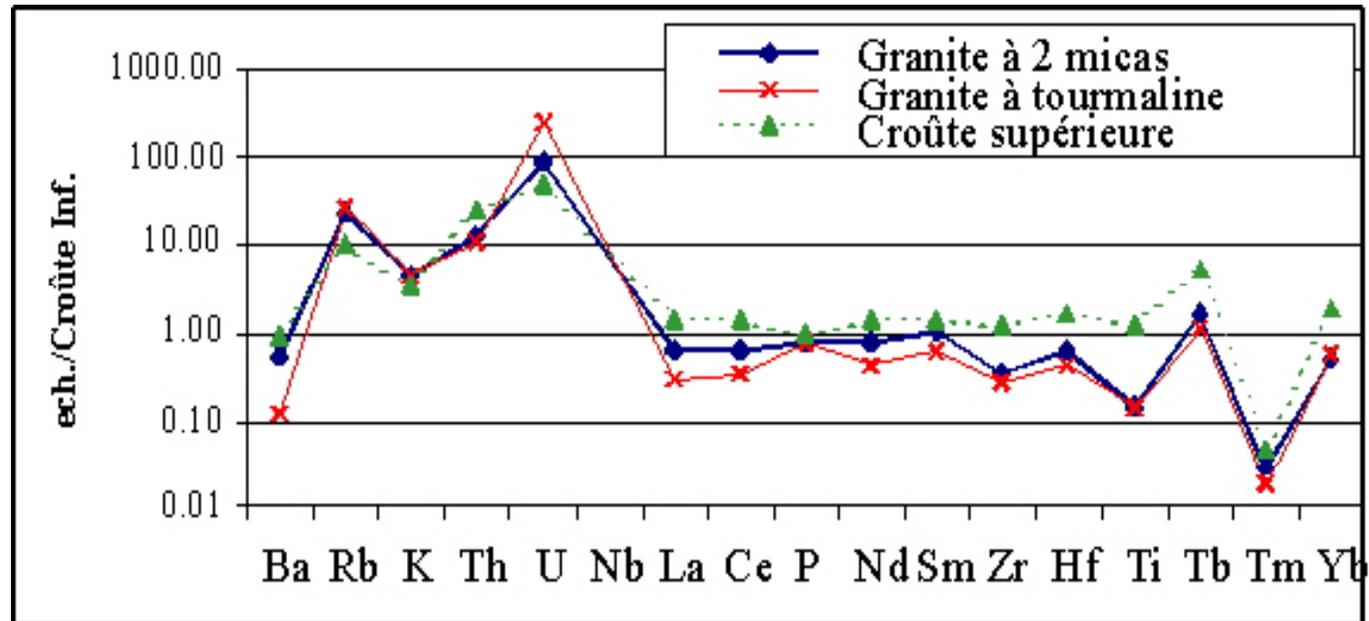
Granite à 2 micas



Granite à tourmaline

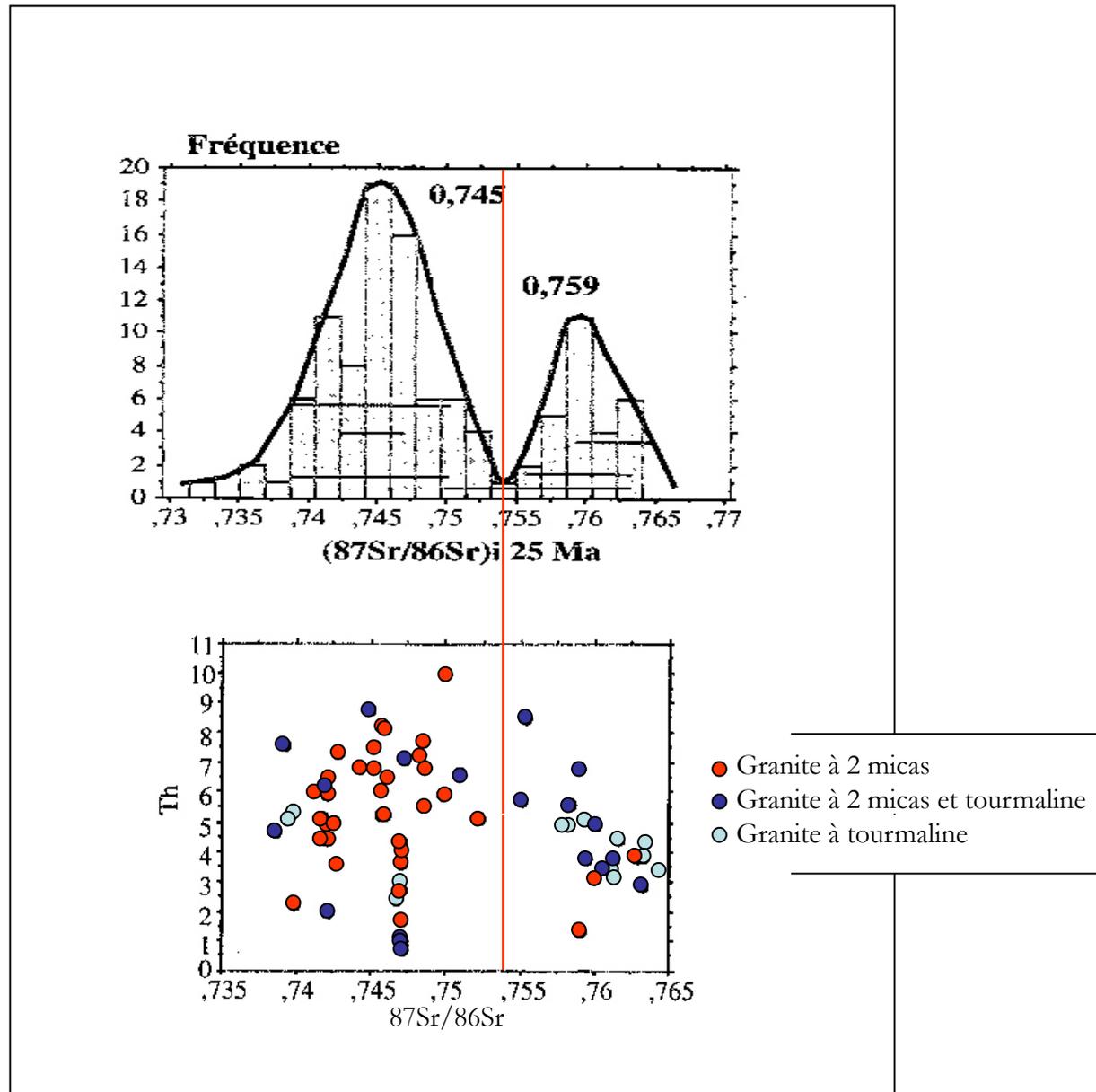
Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Géochimie des leucogranites himalayens



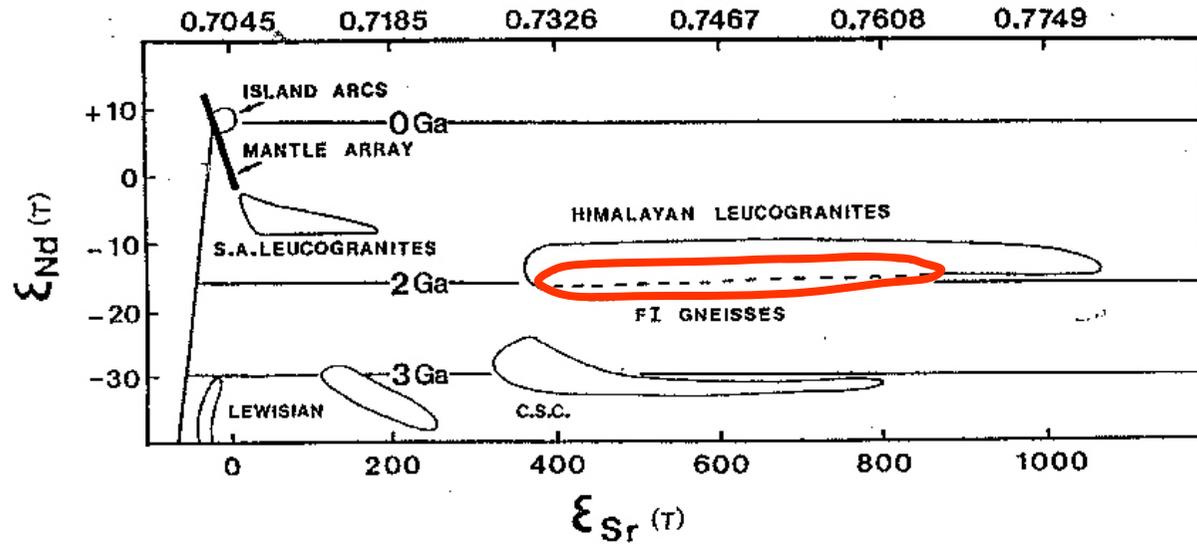
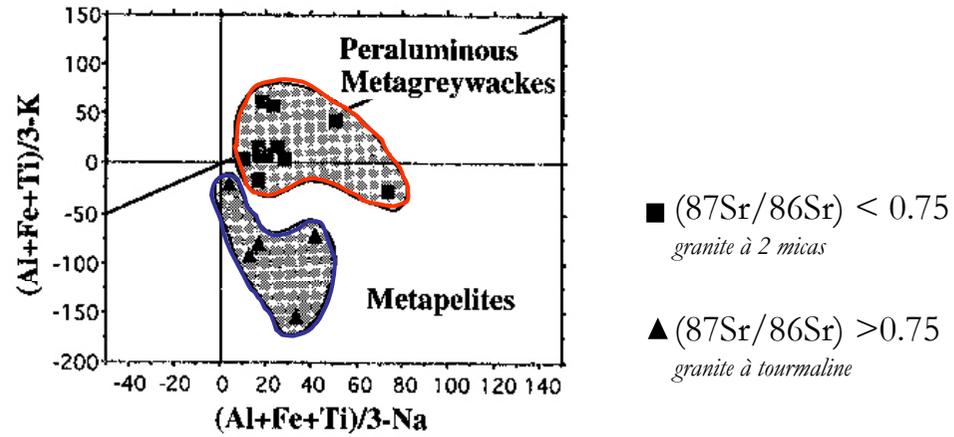
Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Géochimie des leucogranites himalayens



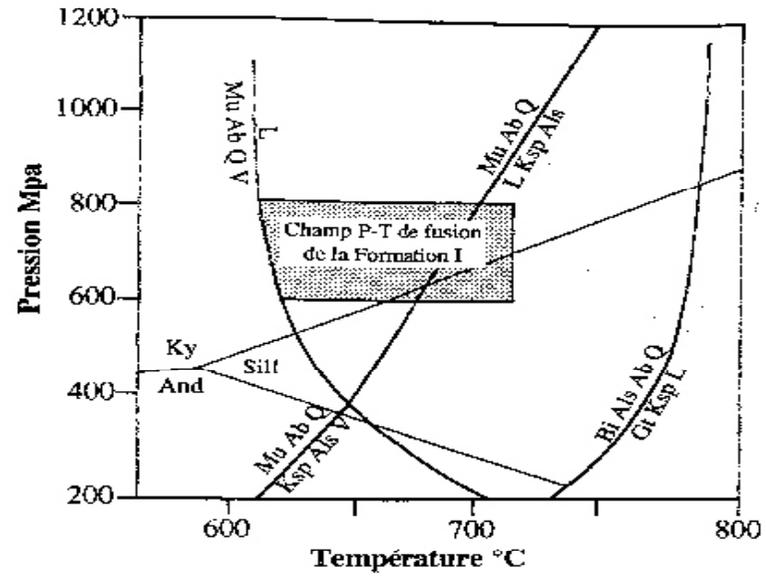
Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Sources des leucogranites himalayens



Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Modalité de la fusion des leucogranites himalayens
modèles de fusion des métapélites



Fusion hydratée :

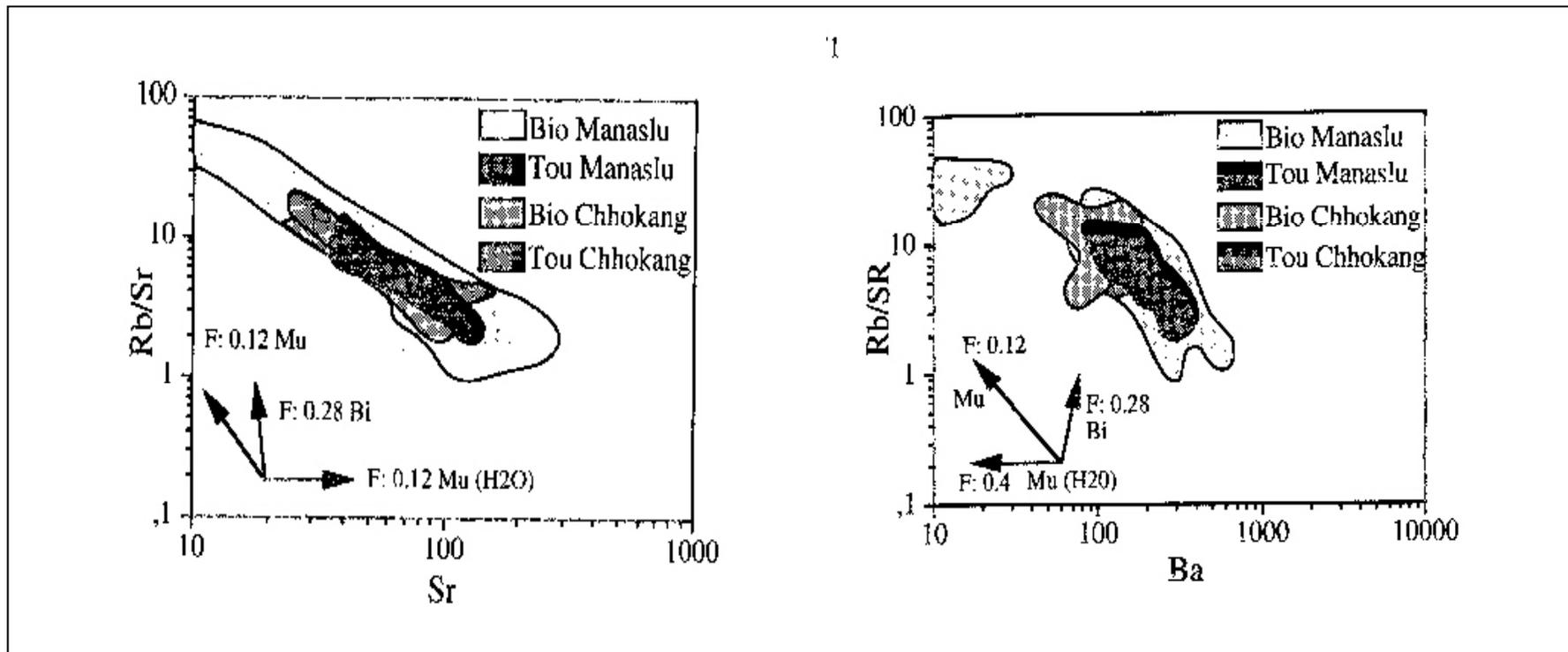
Muscovite + plagio + eau -> **granite**

Fusion anhydre :

Muscovite + plagio -> **granite** + résidu à Kfs et Als

Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

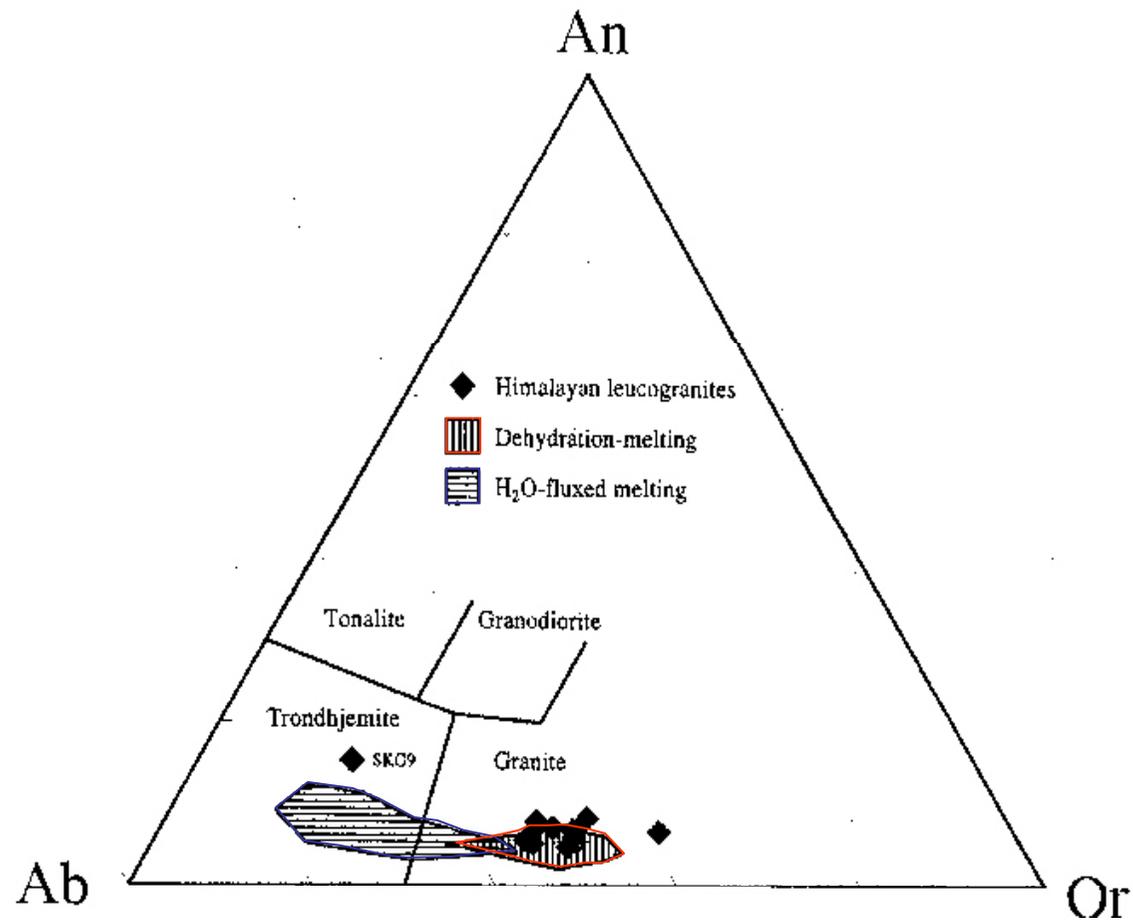
Modalité de la fusion des leucogranites himalayens
modèle de fusion des métapélites



Rb -> Préférentiellement piégé dans les Kfs
Sr -> Préférentiellement piégé dans les plagio

Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Modalité de la fusion des leucogranites himalayens
modèle de fusion des métapélites
pétrologie expérimentale



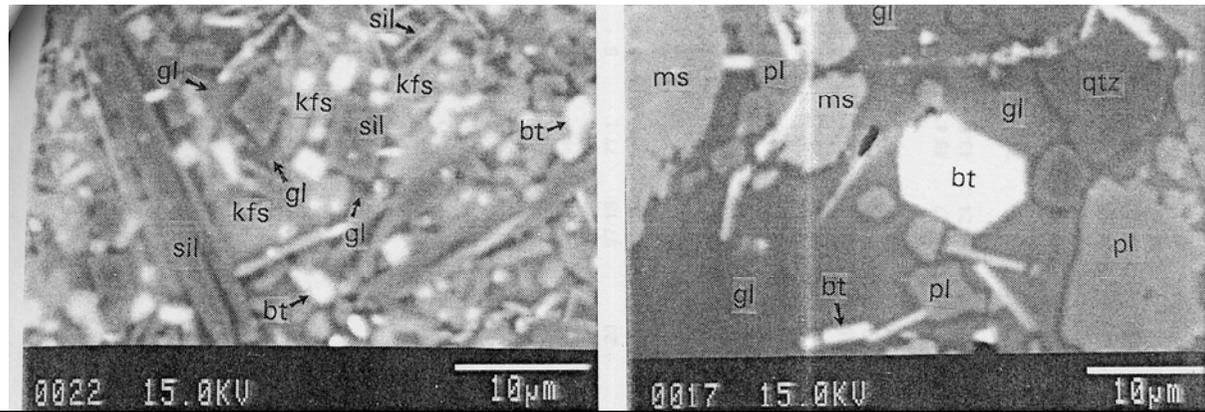
Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Modalité de la fusion des leucogranites himalayens
 modèle de fusion des métapélites
 pétrologie expérimentale

graywackes

- 43 % Qtz
- 28 % PL
- 22 % Ms
- 2% Bt
- 5% Grt

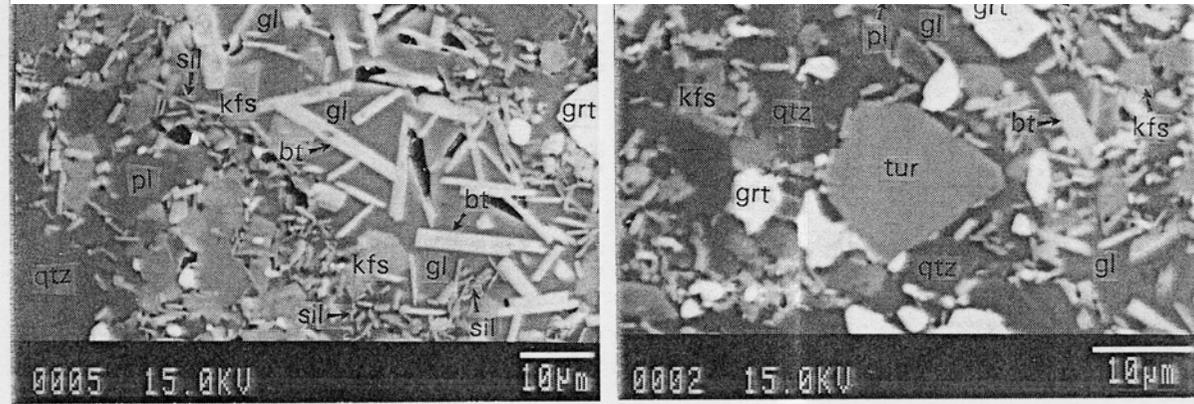
6 kbar, 800 °C *Bt+Kfs+Sil+Grt+L* **6 kbar, 750 °C + 2% H2O** *Ms+Bt+Pl+Grt+Bt+L*



pélites

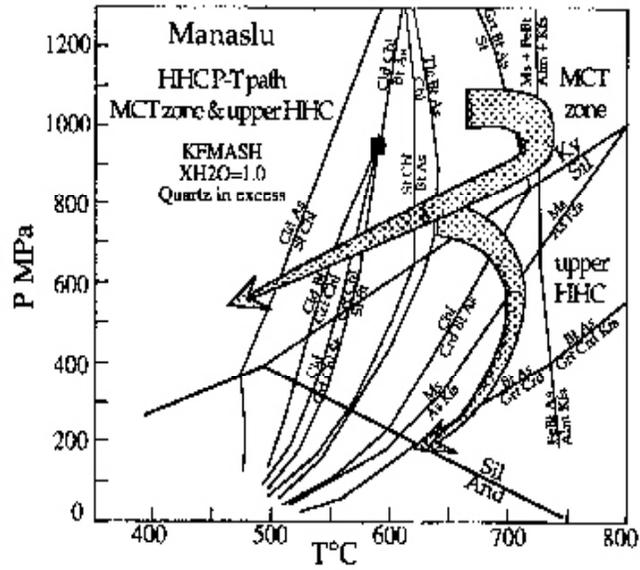
- 38 % Qtz
- 11 % PL
- 29 % Ms
- 13 % Bt
- 6 % Grt

10 kbar, 820 °C *Bt+Kfs+Sil+Grt+L* **10 kbar, 820 °C + 10% tourm** *Bt+Kfs+Sil+Grt+L*

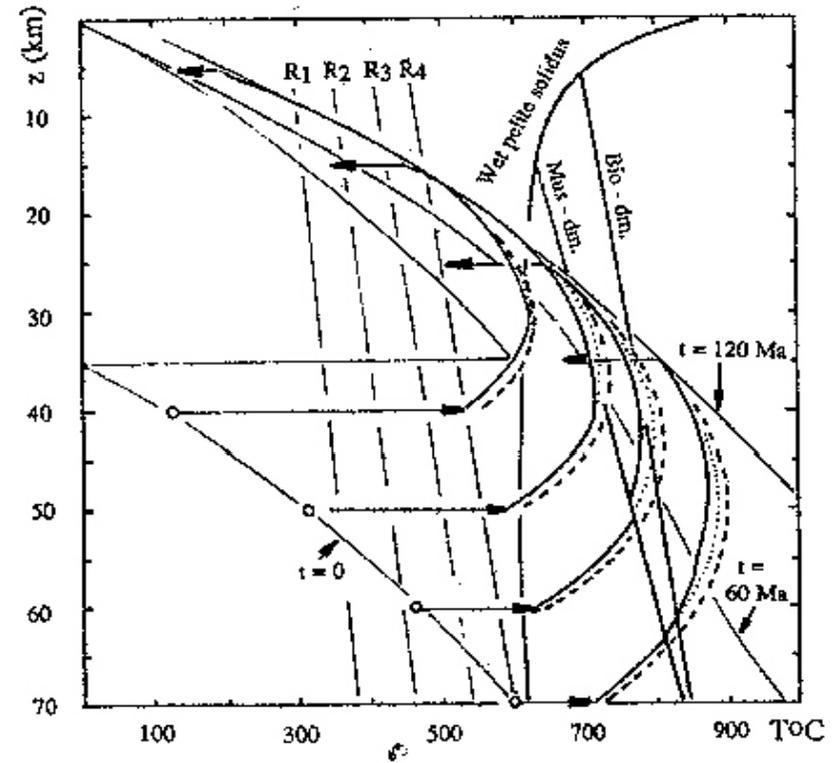


Les granites syncollisionnels du Haut Himalaya

Origine de la fusion des leucogranites himalayens

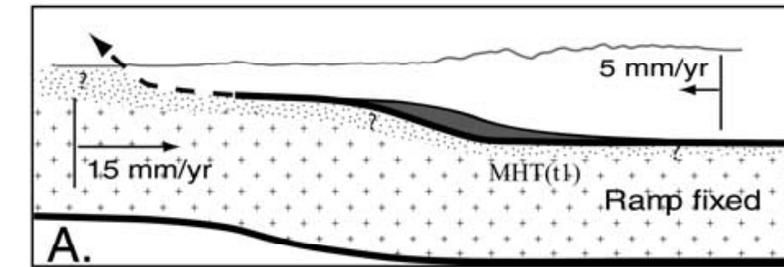


Trajet PT des gneiss du Manaslu

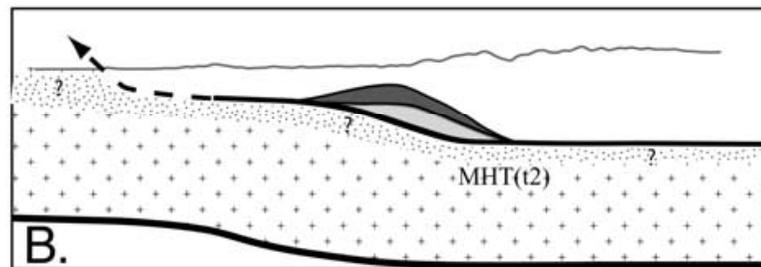


Modèle numérique de l'évolution thermique de deux croûtes continentales superposées

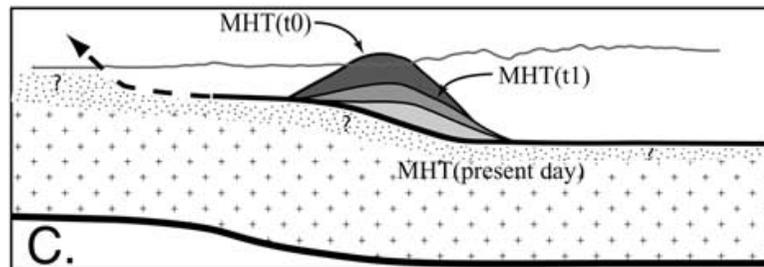
Un modèle alternatif : un prisme d'accrétion par sous-charriage



A.



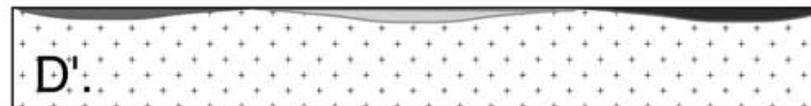
B.



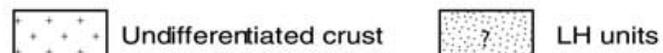
C.



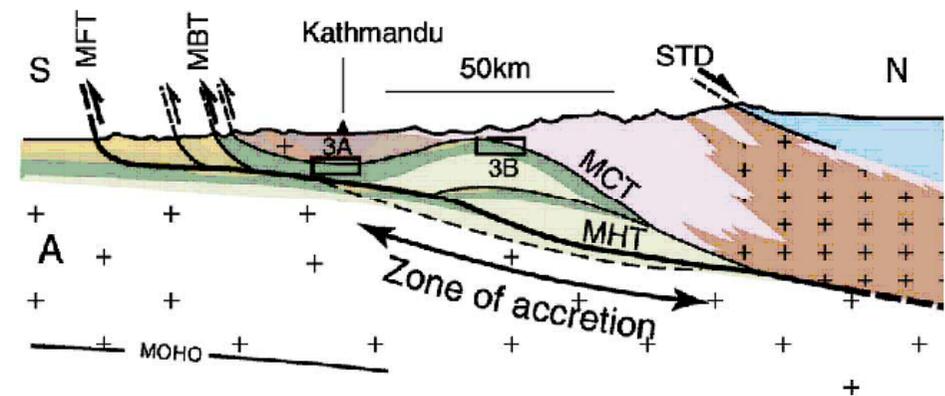
D.



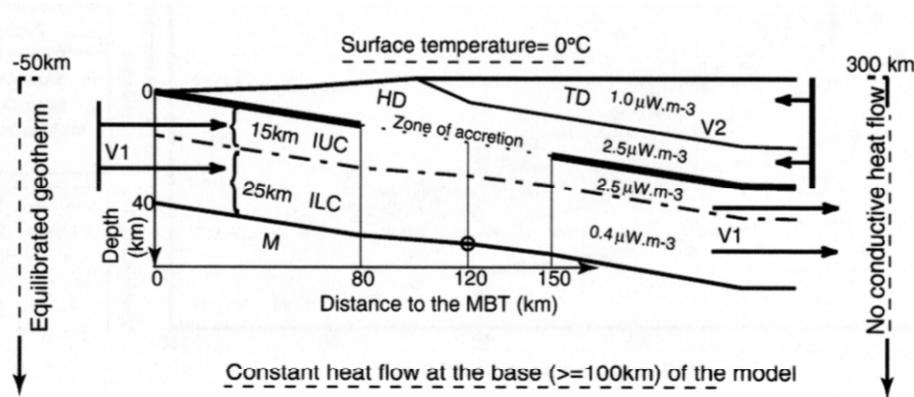
D'.



La nappe de Kathmandou ne s'explique pas dans l'hypothèse du channel flow. La géométrie actuelle s'explique bien par l'empilement d'écailles sous-charriées (prisme d'accrétion)

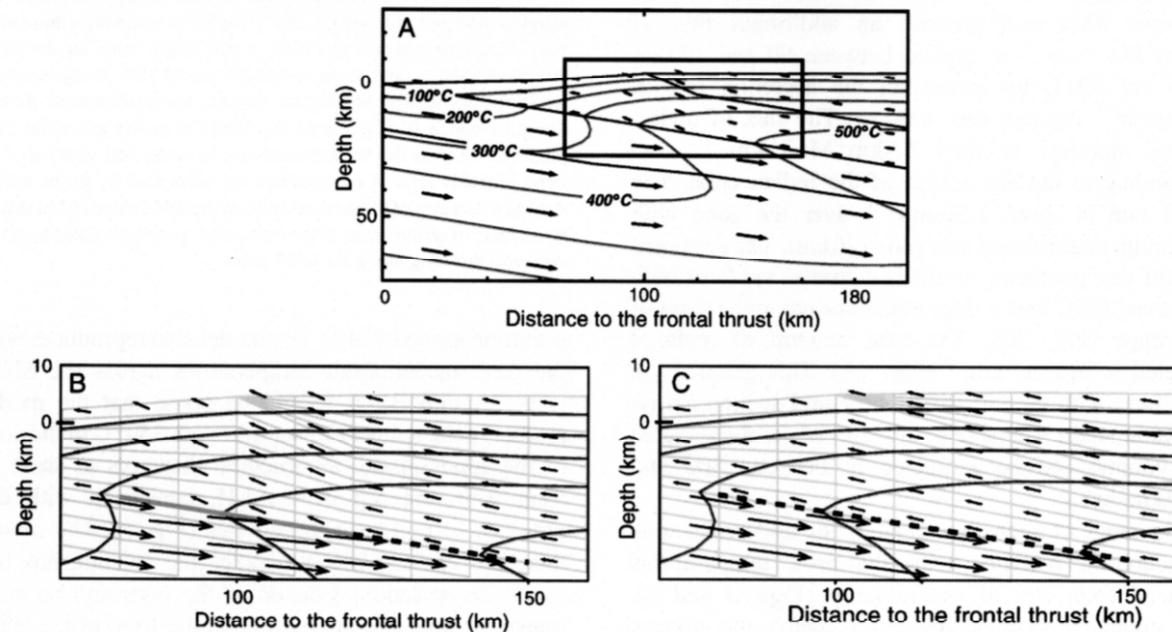


La structure thermique dans le prisme d'accrétion peut se modéliser...



On aboutit aussi à une bonne adéquation avec les données thermo-chronologiques

Le modèle d'exhumation du CHH : une question ouverte, le channel-flow peut être (doit être) remis en cause ?



Un modèle appuyé sur des données thermo-
barométriques et thermochronologiques plus
complètes dans le Moyen et Bas Himalaya

