

Reliefs et Plateaux en Himalaya

Stéphane Guillot

ISTerre, CNRS-UJF Grenoble



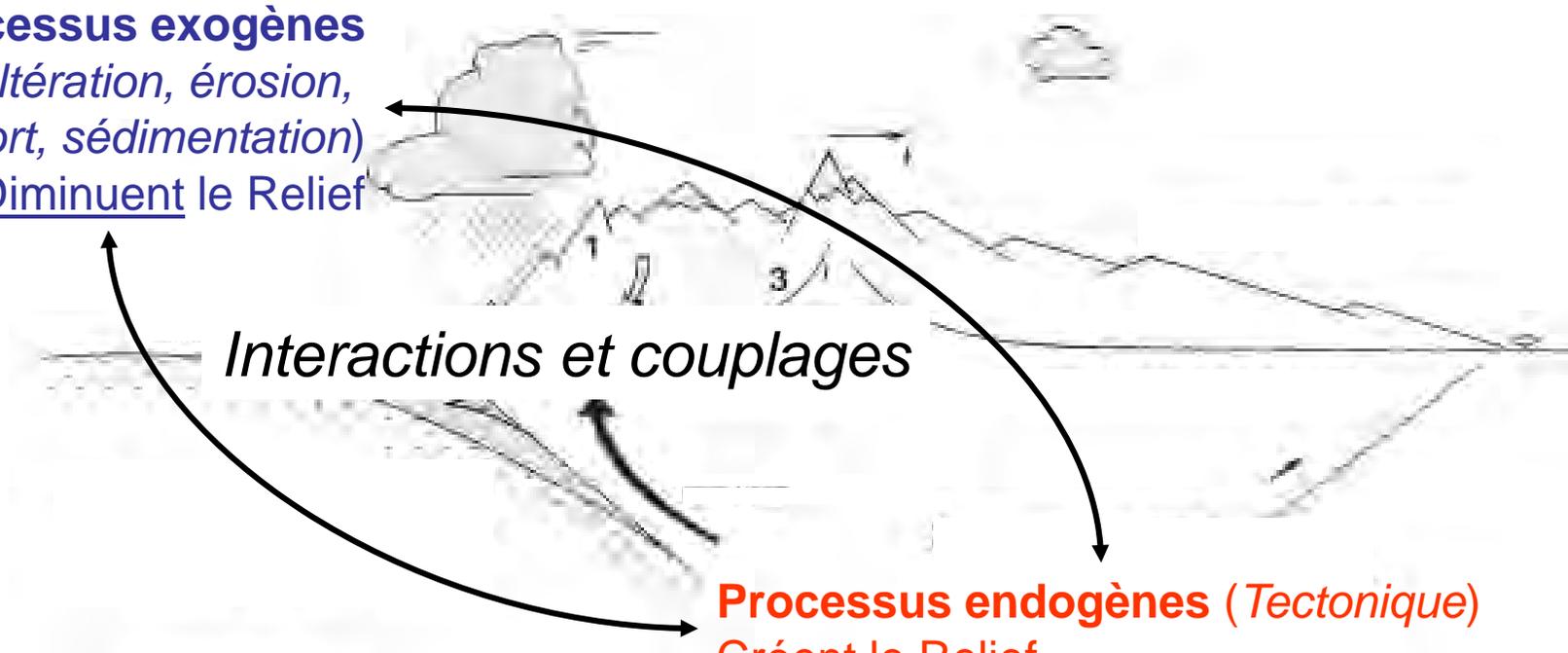
Dynamique de l'érosion et de l'évolution du relief

Processus exogènes
(Altération, érosion,
transport, sédimentation)
Diminuent le Relief

Interactions et couplages

Processus endogènes (Tectonique)
Créent le Relief

Relief = Interface entre **lithosphère** (processus endogènes) et
atmosphère/hydrosphère (processus exogènes)





Le plateau Tibétain:

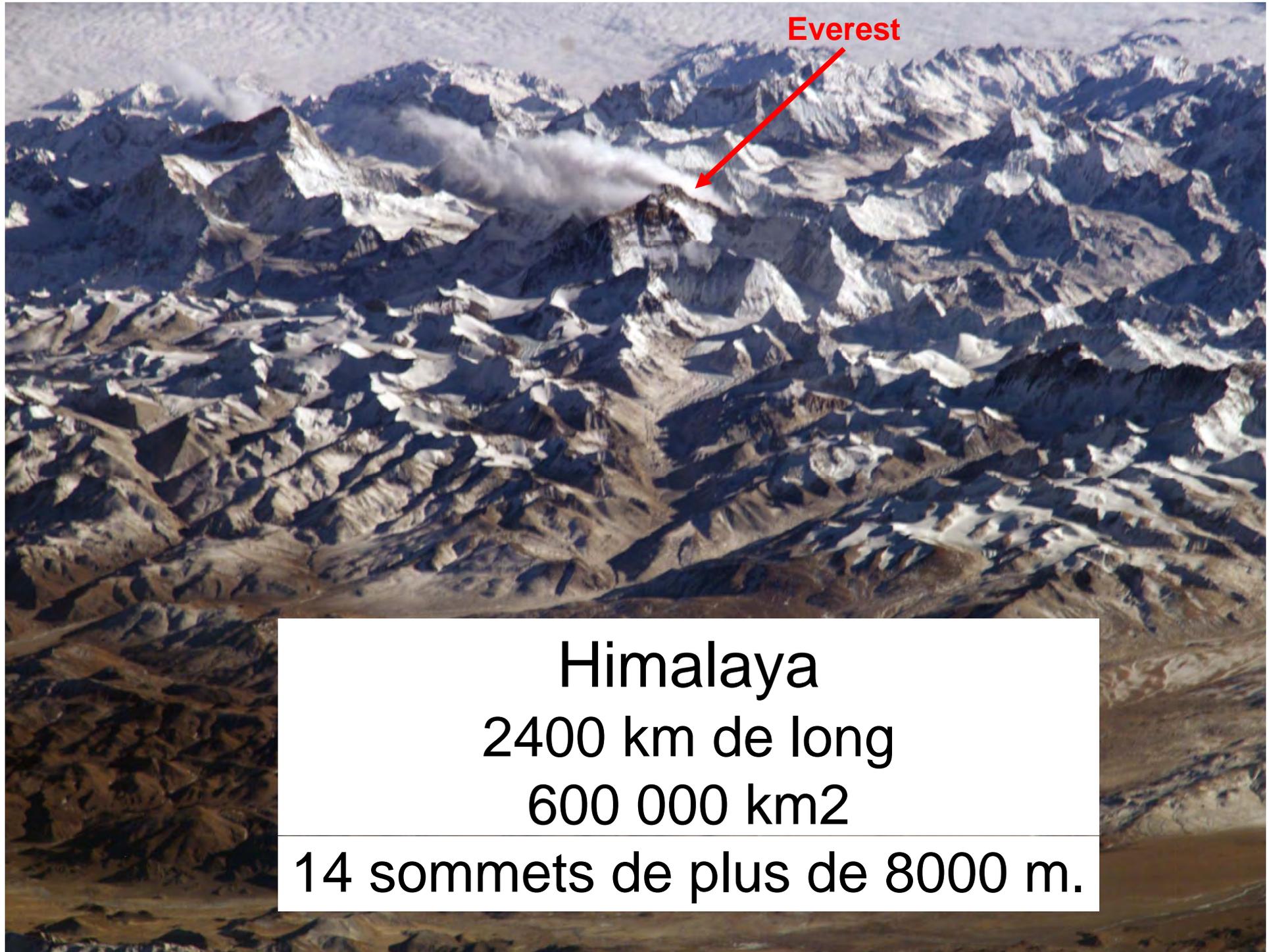
- $\sim 2 \cdot 10^6 \text{ km}^2$
- 4800 m d'altitude moyenne
- dénivelés topographiques extrêmes au N (bassin du Tarim) et au S (Himalaya)



Photo : R. Lacassin



Photo : R. Lacassin

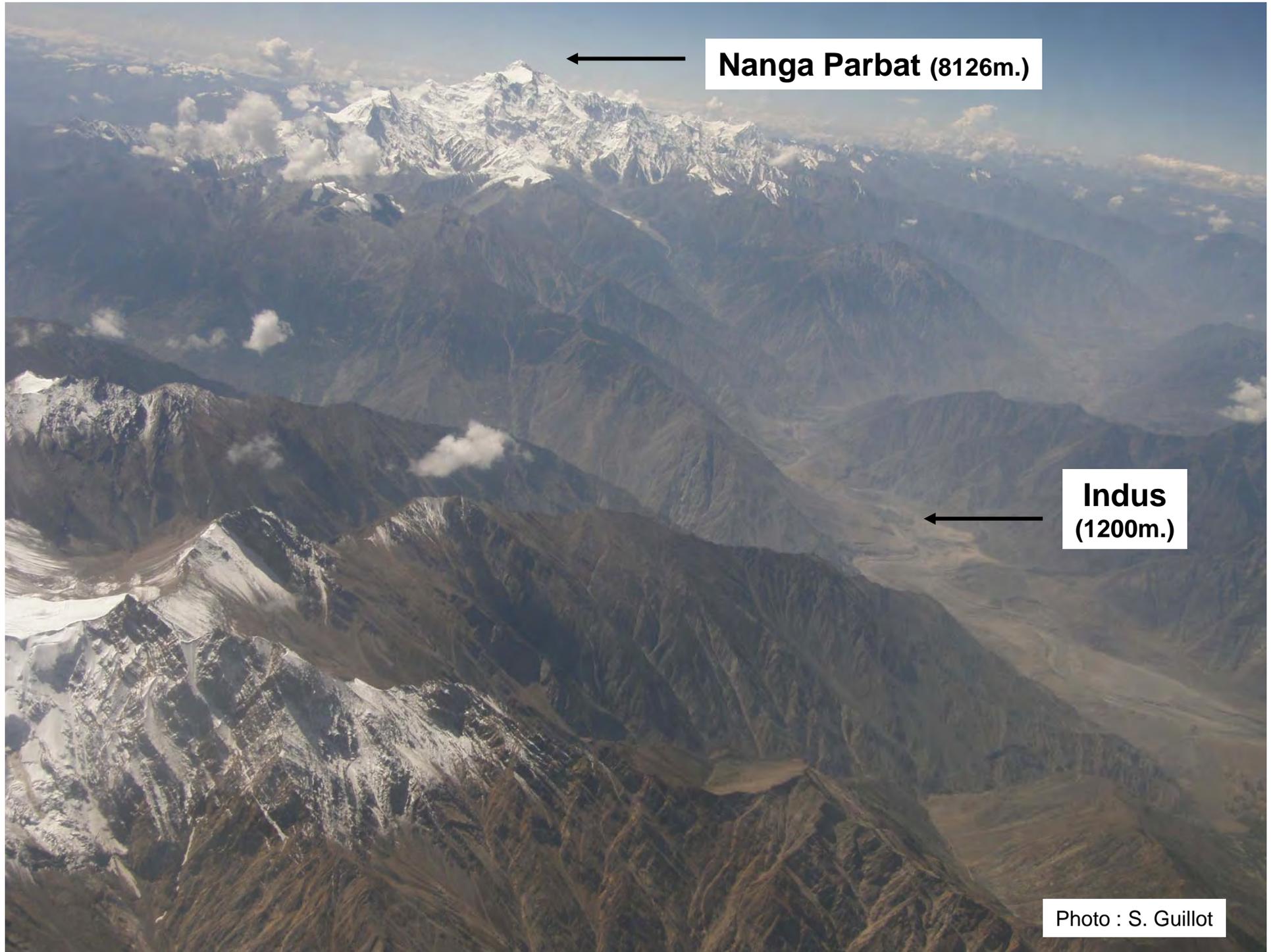


Himalaya

2400 km de long

600 000 km²

14 sommets de plus de 8000 m.

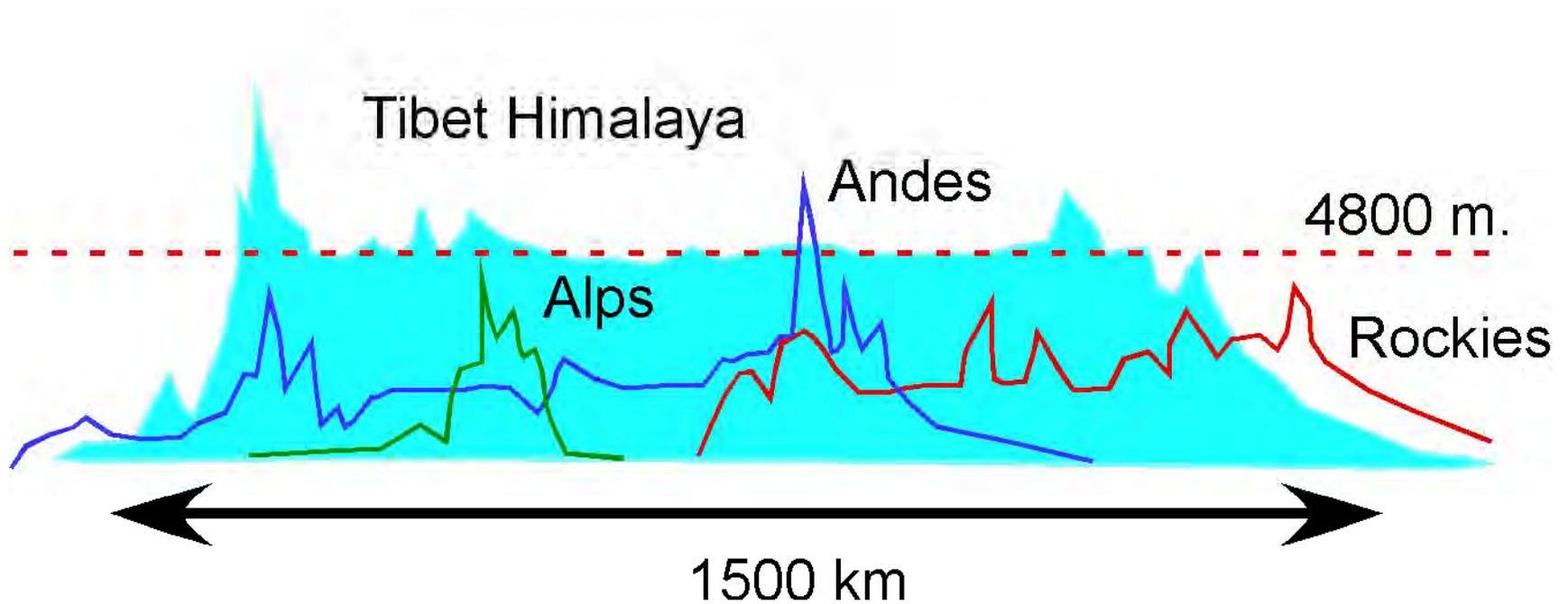


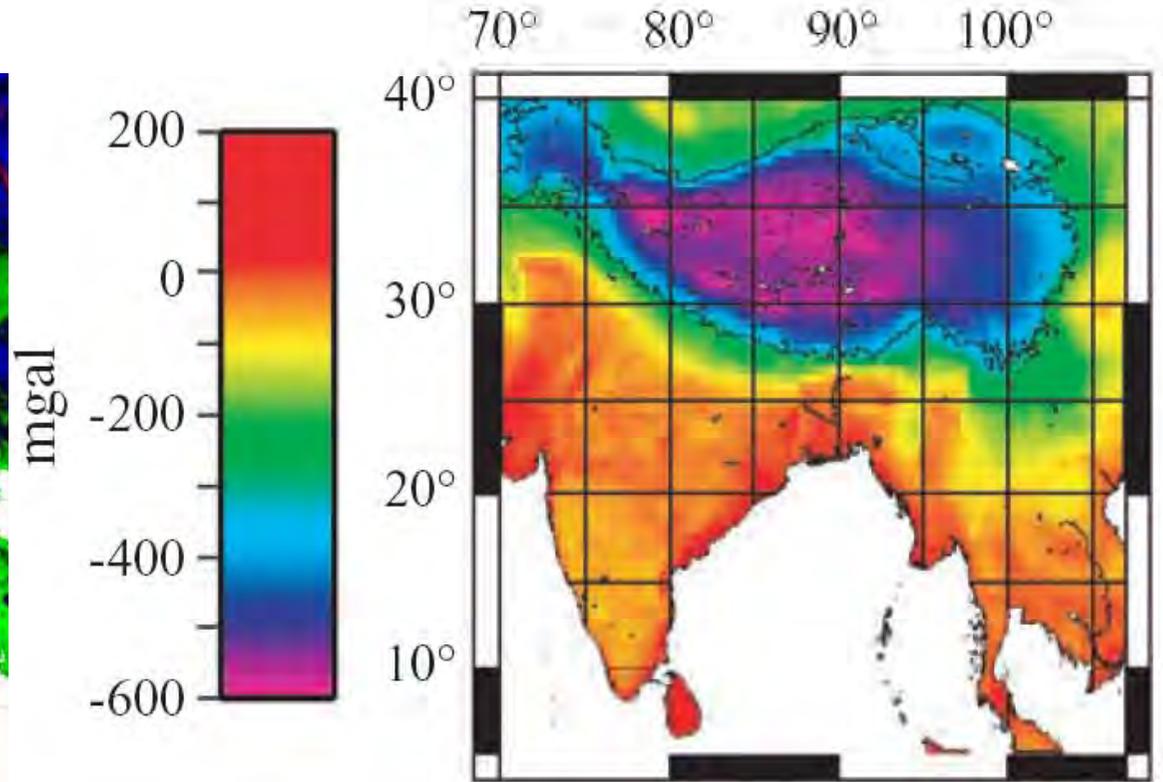
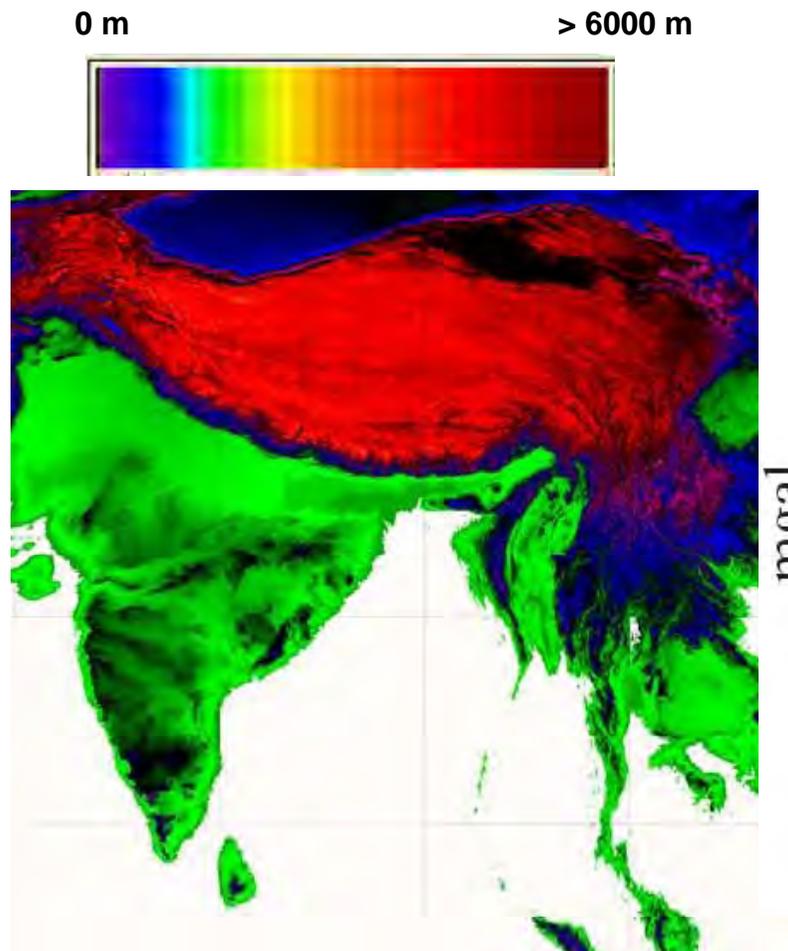
Nanga Parbat (8126m.)

**Indus
(1200m.)**

Photo : S. Guillot

Topographic profiles of Four Major Mountain Ranges

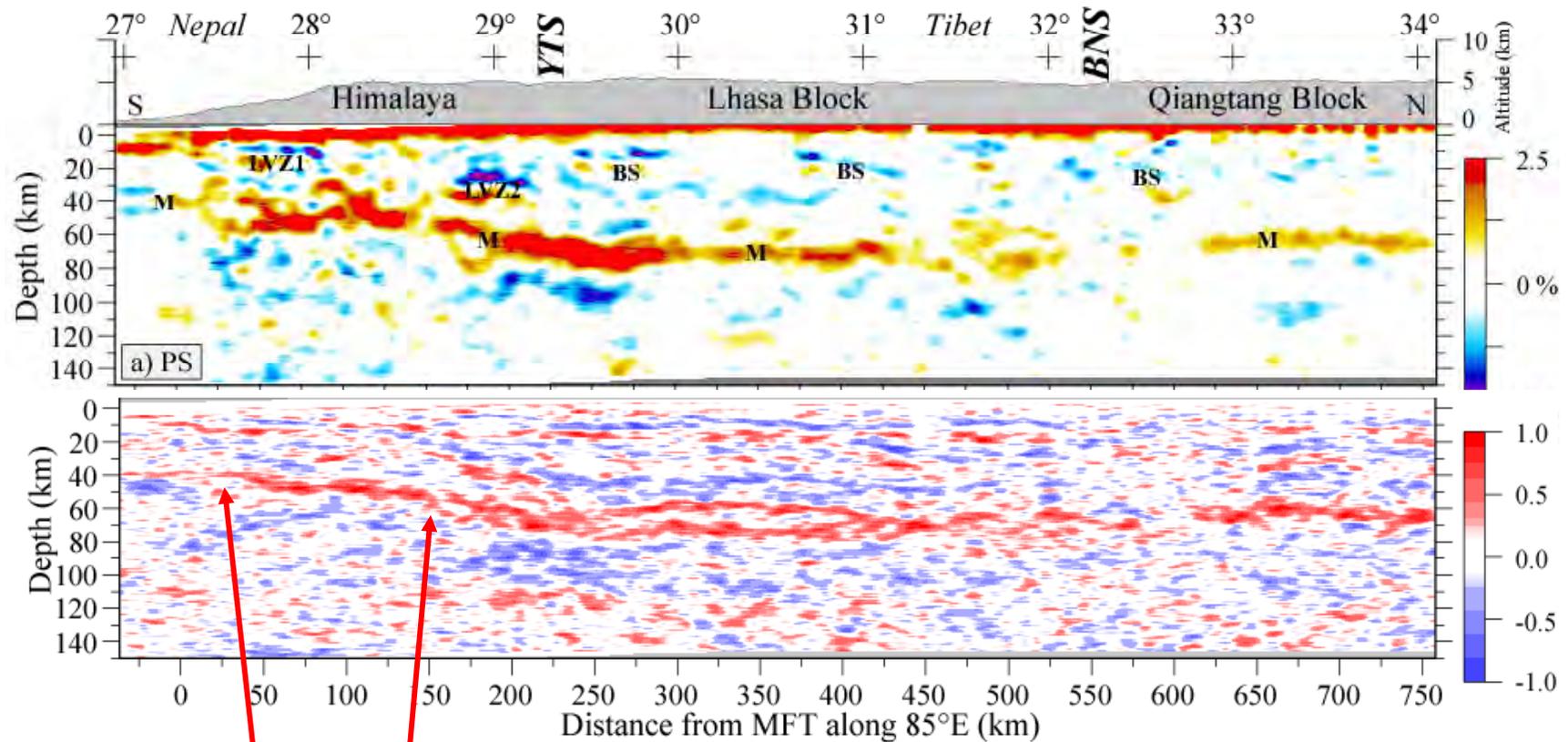




**Anomalie de Bouguer
(Jordan & Watts, 2005)**

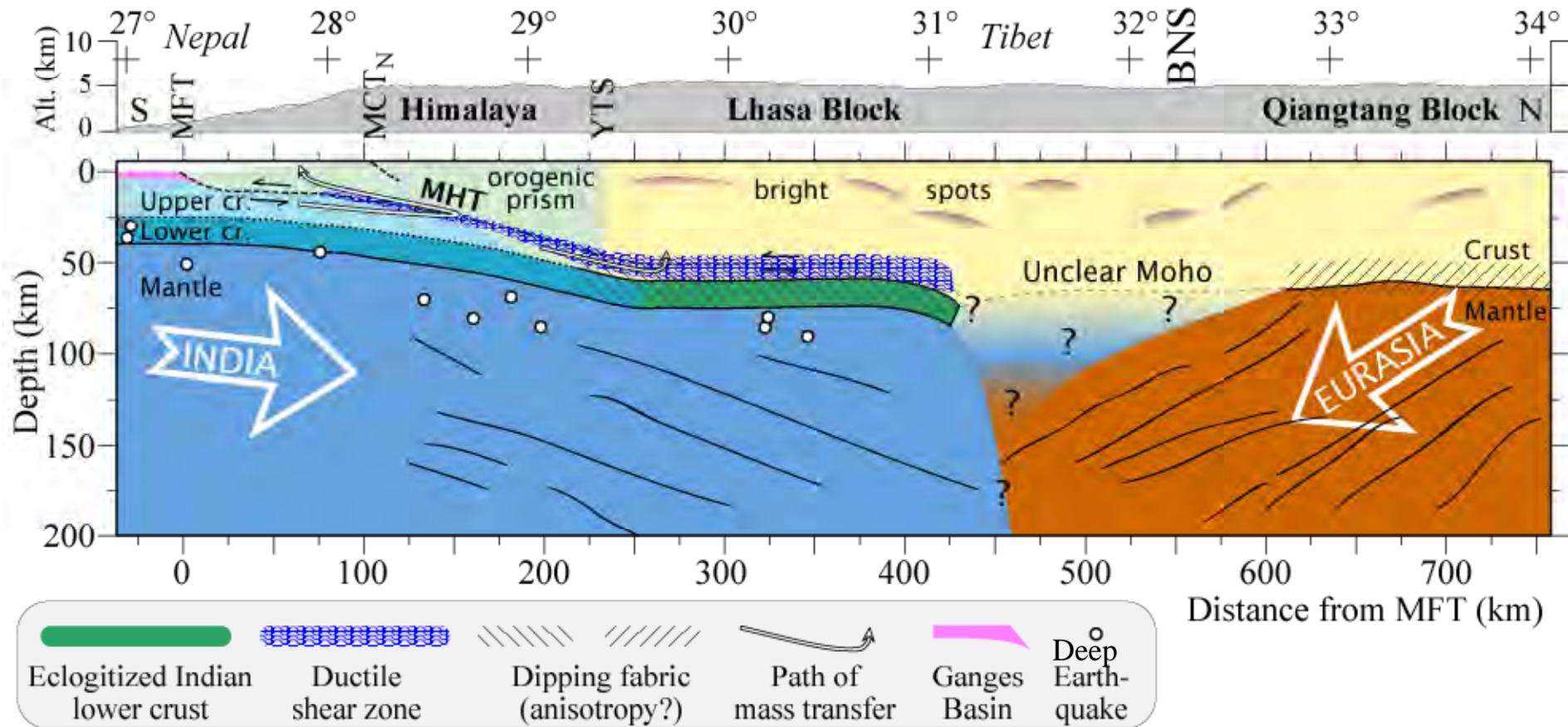
=> Zone d'épaississement crustal majeur

Image du Moho le long du profil Hi-Climb (fonctions récepteur migrées)



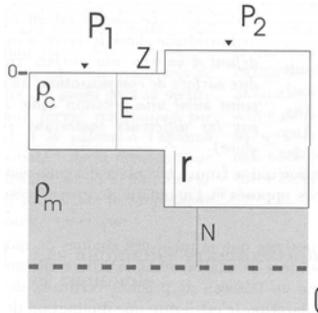
- Moho très clair sous le Népal à ~40 km
- Il plonge régulièrement vers le N sous le Ht-Himalaya et la suture du Tsang Po jusqu'à ~75 km

Interprétation des images en fonction récepteur



(Chen & Yang, 2004)

Modélisation de l'anomalie de Bouguer



Modèle de compensation isostatique locale d'Airy:

$$P_1 = P_2 \Rightarrow r (\rho_m - \rho_c) = z \rho_c$$

Calculs à la louche:

$$\rho_c = 2,8 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, \rho_m = 3,3 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3, E = 40 \text{ km}$$

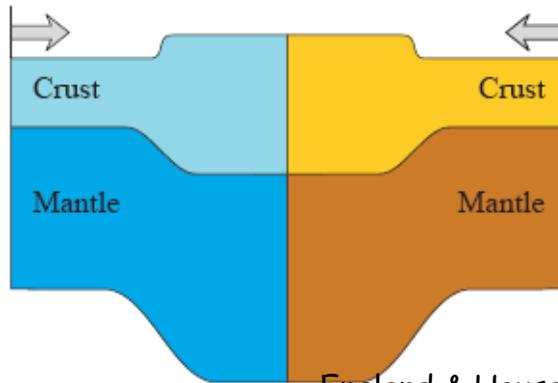
➤ Sud-Tibet: $z = 5000\text{m} \Rightarrow r = 28 \text{ km} \Rightarrow H_c = r + E + z = \mathbf{73 \text{ km}}$

\Rightarrow modèle d'Airy ~OK

➤ le relief est compensé isostatiquement par la racine crustale

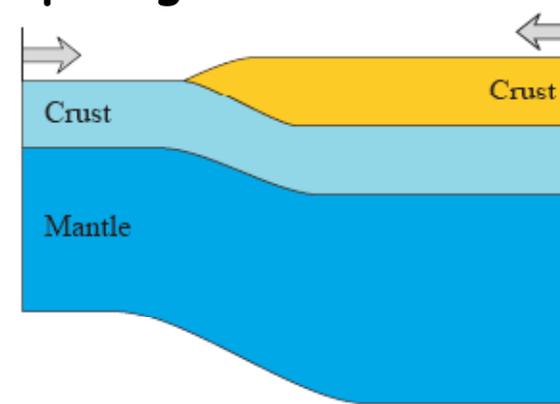
Et que se passe-t'il en profondeur? Modèles de formation du plateau

Épaississement diffus



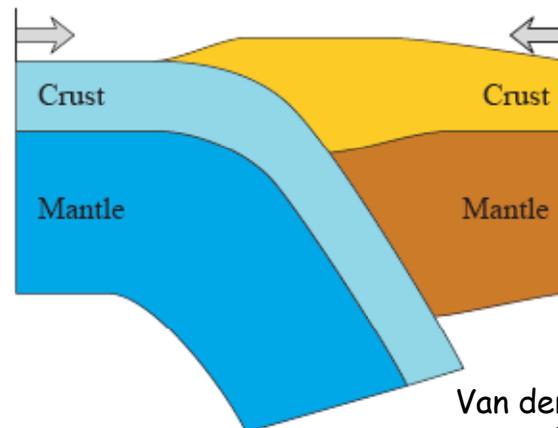
England & Houseman, 1986, 1989
Holt et al., 1995, 2000

Sous-placage



Argand, 1924
Gansser, 1964
Powell & Conaghan, 1973

Subduction



Miyashiro, 1982
Van der Voo et al., 1999
Tapponnier, 2001

Modèle 1: La lithosphère continentale s déforme de façon continue, diffuse, comme un fluide de très forte viscosité

Modèle de England & Houseman (1986): pas de discontinuités mécaniques introduites a priori; modélisation de la surrection

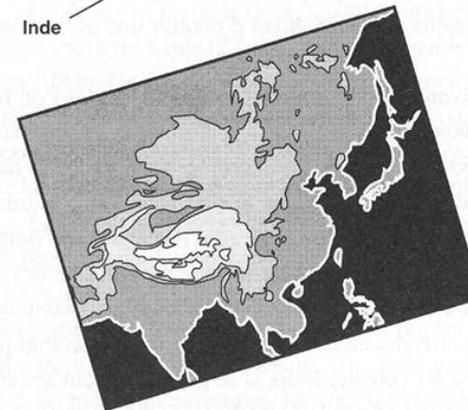
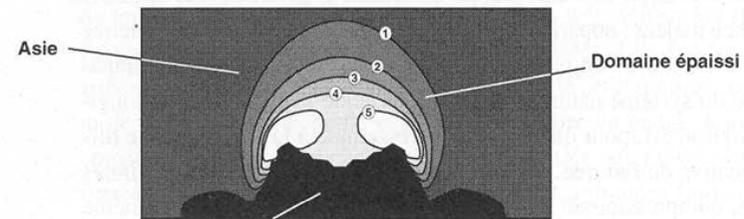
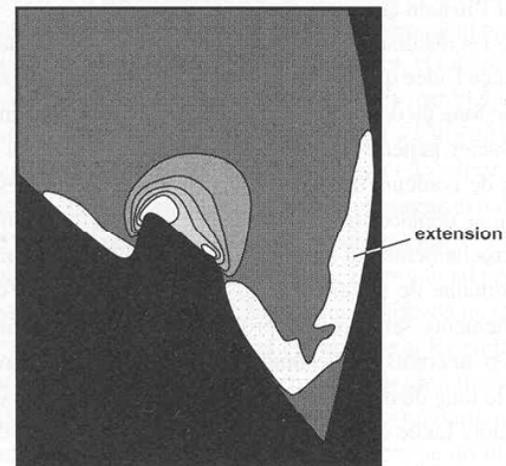
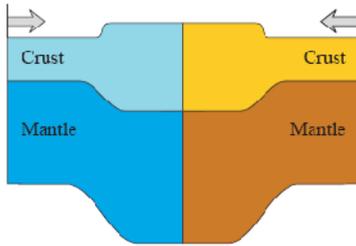


Figure VIII.51
Modèles numériques de poinçonnement d'une lithosphère par un piston rigide avec différentes géométries. Les chiffres portés sur le schéma du haut représentent les altitudes calculées dans le modèle en kilomètres (England & Houseman, 1986 ; Houseman & England, 1993).





1. Épaississement homogène (« Tibet mou »)

a) **épaississement** de la lithosphère tibétaine (croûte+manteau) par indentation de l'Inde \Rightarrow soulèvement jusqu'à 3500-4000m d'altitude

b) **délamination** du manteau lithosphérique épaissi et en déséquilibre gravitaire \Rightarrow soulèvement brutal et récent du plateau jusqu'à 5500m

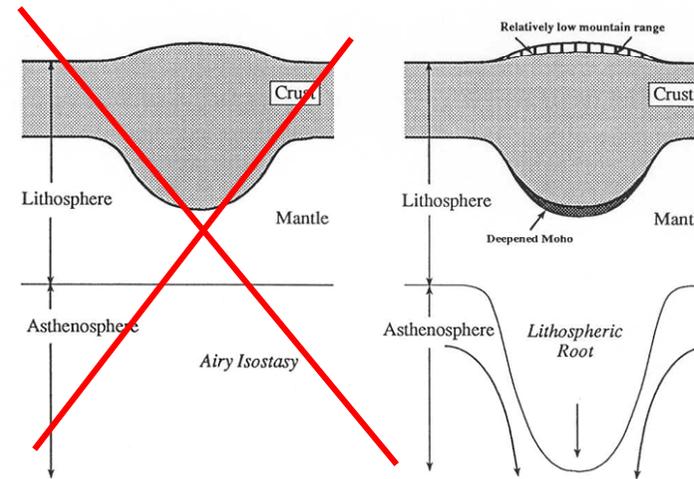
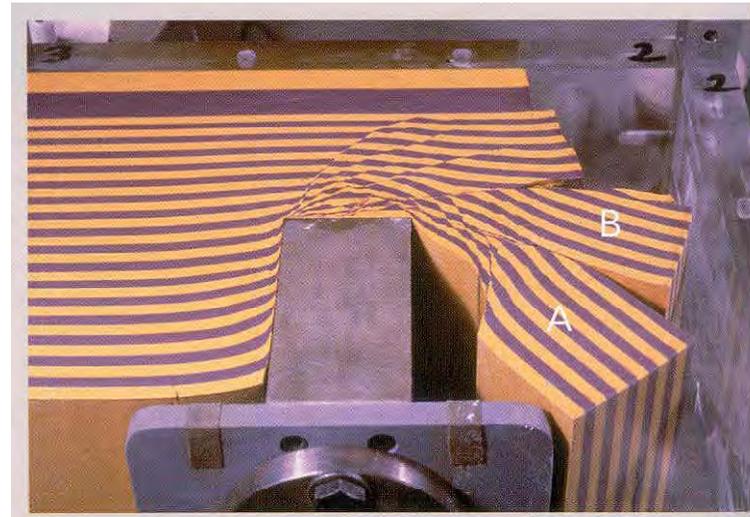


Figure 5. Simple cross sections across mountain belts showing the difference between (left) crustal thickening with Airy isostatic compensation and (right) thickening of the entire mantle lithosphere. The excess mass in the lithospheric root of cold mantle material pulls the overlying crust down, deepening the Moho and maintaining a lower elevation than is otherwise attainable. Both the excess weight of the lithospheric root and the lateral temperature gradients associated with it create the potential for a convective instability.

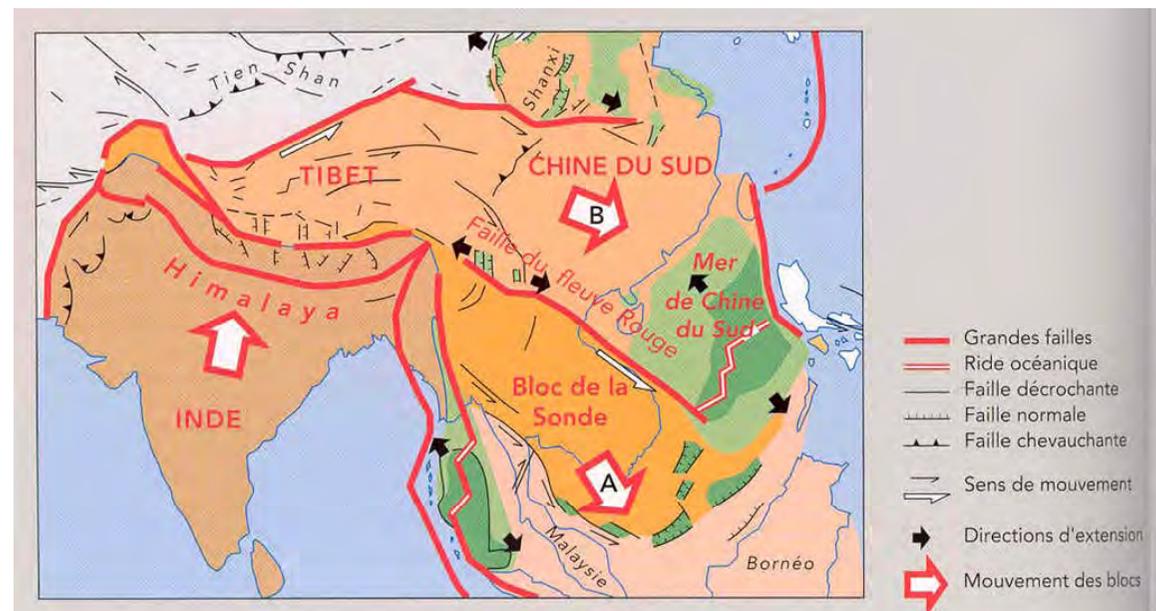
Conséquences:

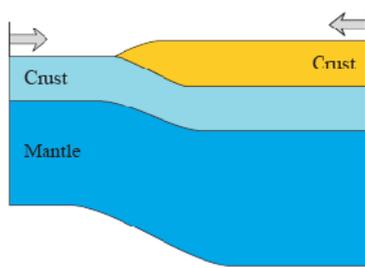
- rebond récent du plateau (5 Ma ?),
- remontée d'un panache asthénosphérique chaud et léger \Rightarrow fusion partielle de la croûte inf. \Rightarrow maintien du plateau en altitude par « flottaison » de la croûte sup. sur croûte inf. et manteau visqueux, chauds, légers.

Modèle 2: La lithosphère continentale localise beaucoup la déformation, qui se concentre exclusivement sur quelques grandes failles majeures; L'extrusion latérale vers l'est joue alors un rôle majeur dans la cinématique de toute la Chine et l'Asie du sud-est.



Modèle de Peltzer & Tapponnier (1988): pas de déplacements verticaux possibles (plaque de verre)





2. Sous-placage

La lithosphère indienne intacte est sous-charriée sous le plateau tibétain

Variante: injection de la croûte indienne dans la croûte inférieure tibétaine (« vérin hydraulique »)

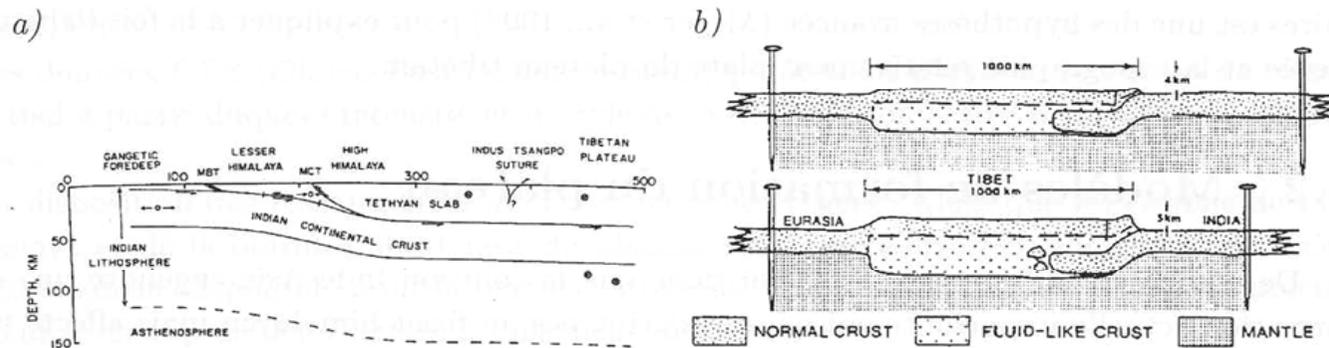
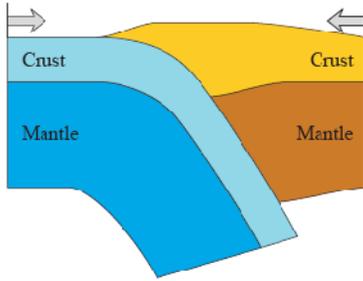
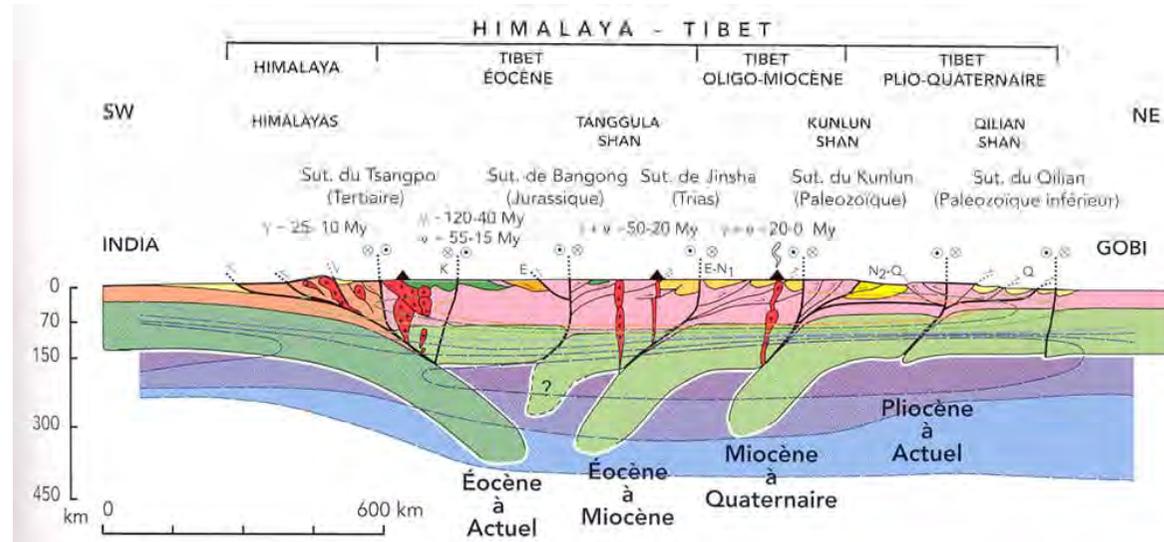


FIG. 1.8 – Deux modèles où la subduction de l'Inde est l'élément moteur de l'élévation du plateau . a) L'ensemble de la lithosphère indienne subducte horizontalement sous tout le Tibet (Ni et Barazangi, 1983). b) Modèle où la croûte indienne joue le rôle d'un vérin dans la croûte tibétaine fluide (Zhao et Morgan, 1985).

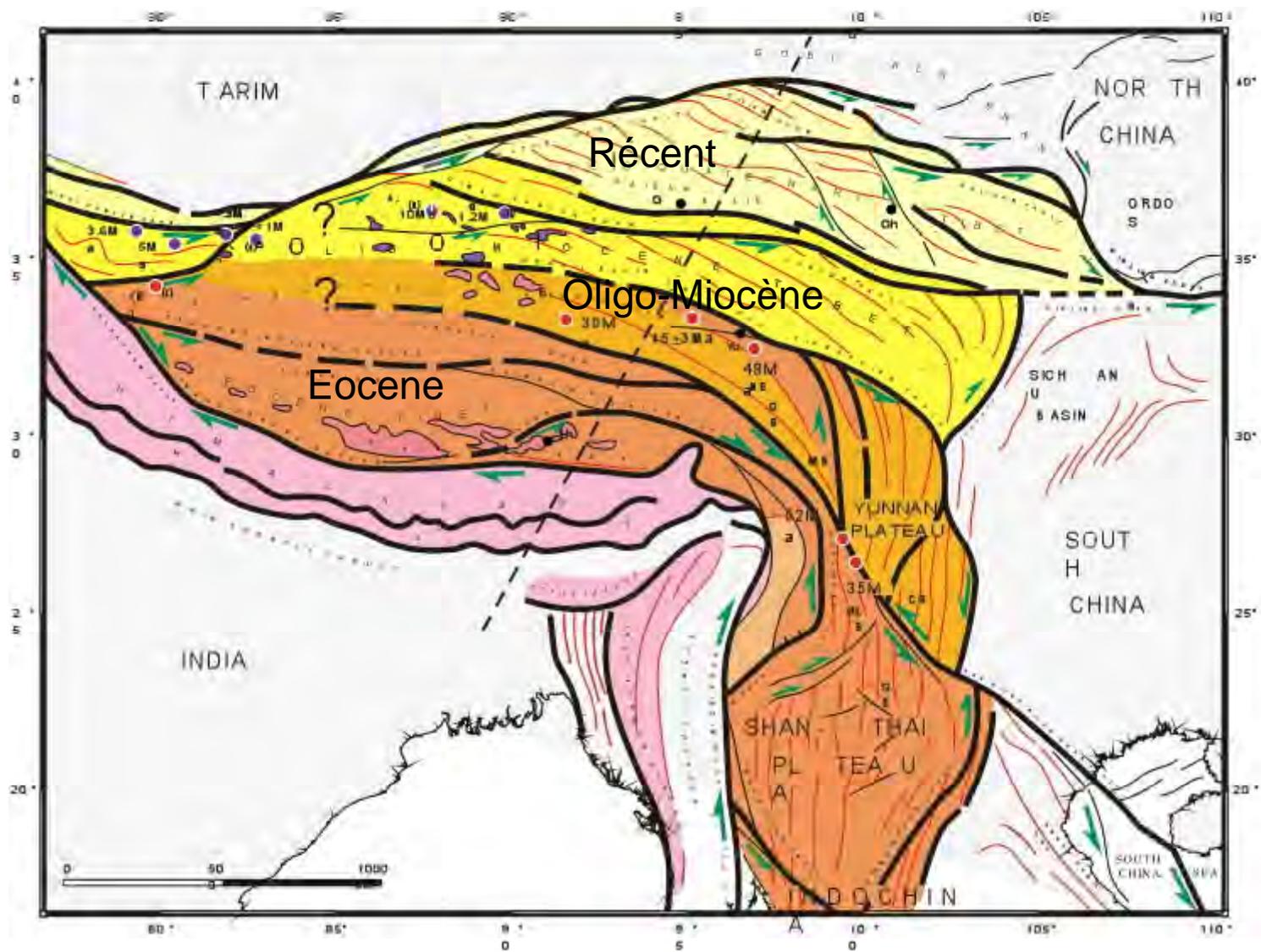


3. Subductions + décrochements: déformation localisée

- chevauchements obliques le long de grandes failles lithosphériques (⇒ compression + cisaillement sénestre),
- épaissement crustal (par formation de prismes d'accrétion crustaux),
- subduction vers le sud du manteau lithosphérique (qui ne s'épaissit pas car découplage mécanique au Moho),



- remplissage par des sédiments détritiques des bassins fermés par les chaînes de montagne (⇒ Tibet « plat »)
- formation du plateau en 3 stades du sud vers l'est et le nord-est, correspondant à 3 subductions successives, sur la suture de Jinsha, puis celle du Kunlun, puis celle du Qilian (subduction actuellement en formation) ⇒ le plateau se propage vers le nord-est



Sismique réflexion verticale: profils INDEPTH-2 au sud-Tibet

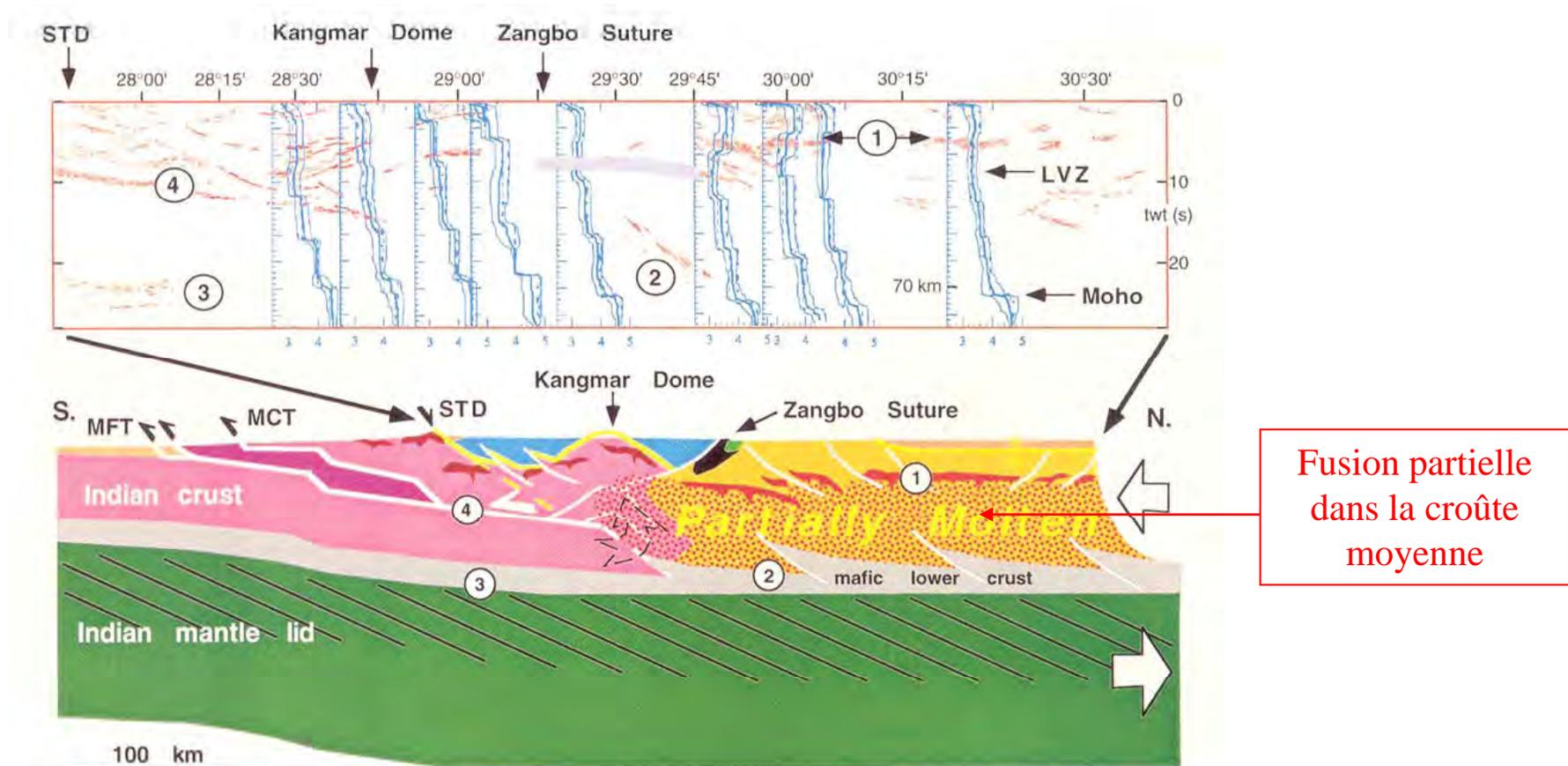
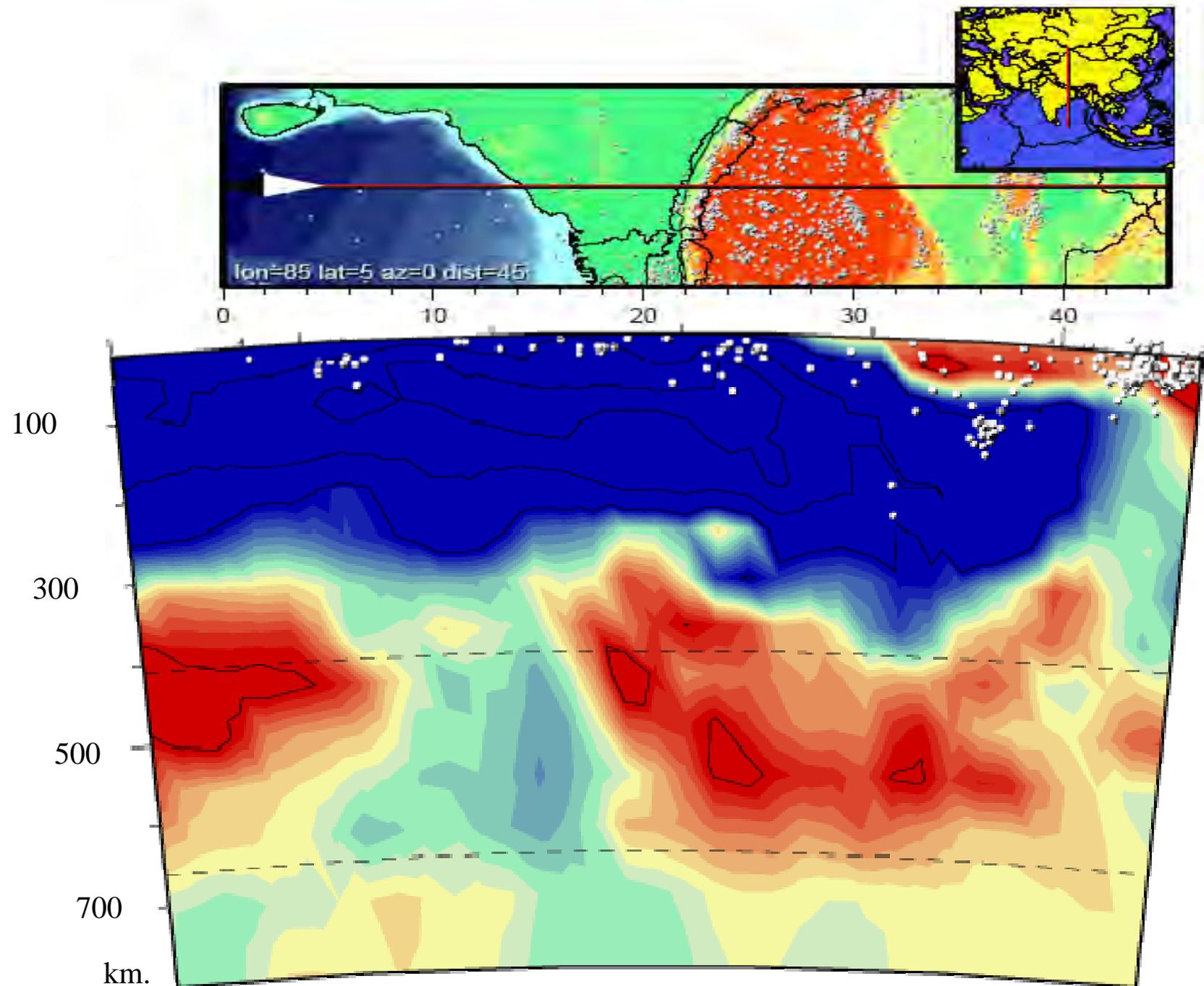


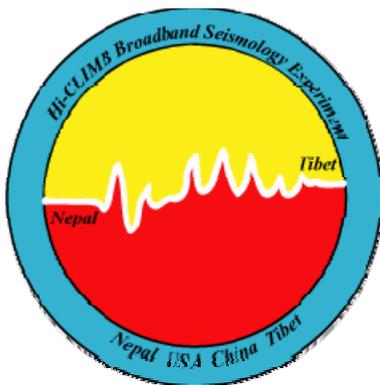
Fig. 2. (Top) Composite of selected INDEPTH geophysical observations along the Yadong-Gulu rift in southern Tibet; red, composite north-south CMP profile described in (6); blue, one-dimensional shear-wave velocity profiles derived from broadband earthquake data (7); blue stipple, wide-angle reflection observed in CMP data gap beneath and just north of the Zangbo

suture; LVZ, midcrustal low-velocity zone evident in shear-wave velocity cross-section of the Himalayan collision zone (see text). **(Bottom)** Interpretive lithosphere-scale cross-section of the Himalayan collision zone (see text). MFT, Main Frontal thrust; MCT, Main Central thrust; STD, South Tibetan detachment system. Numbers refer to features discussed in text.



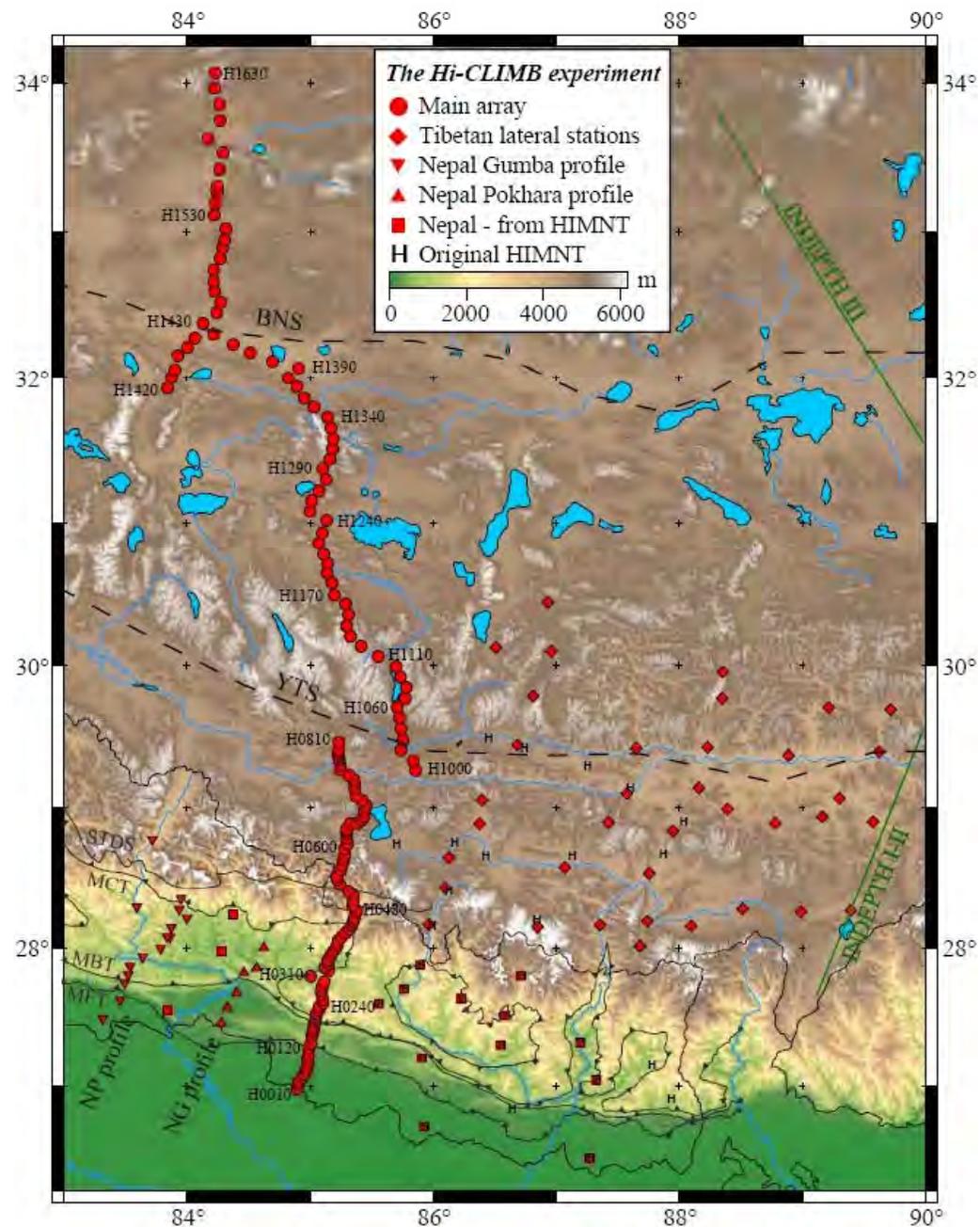
(Replumaz et al., Tectonophy 2009)

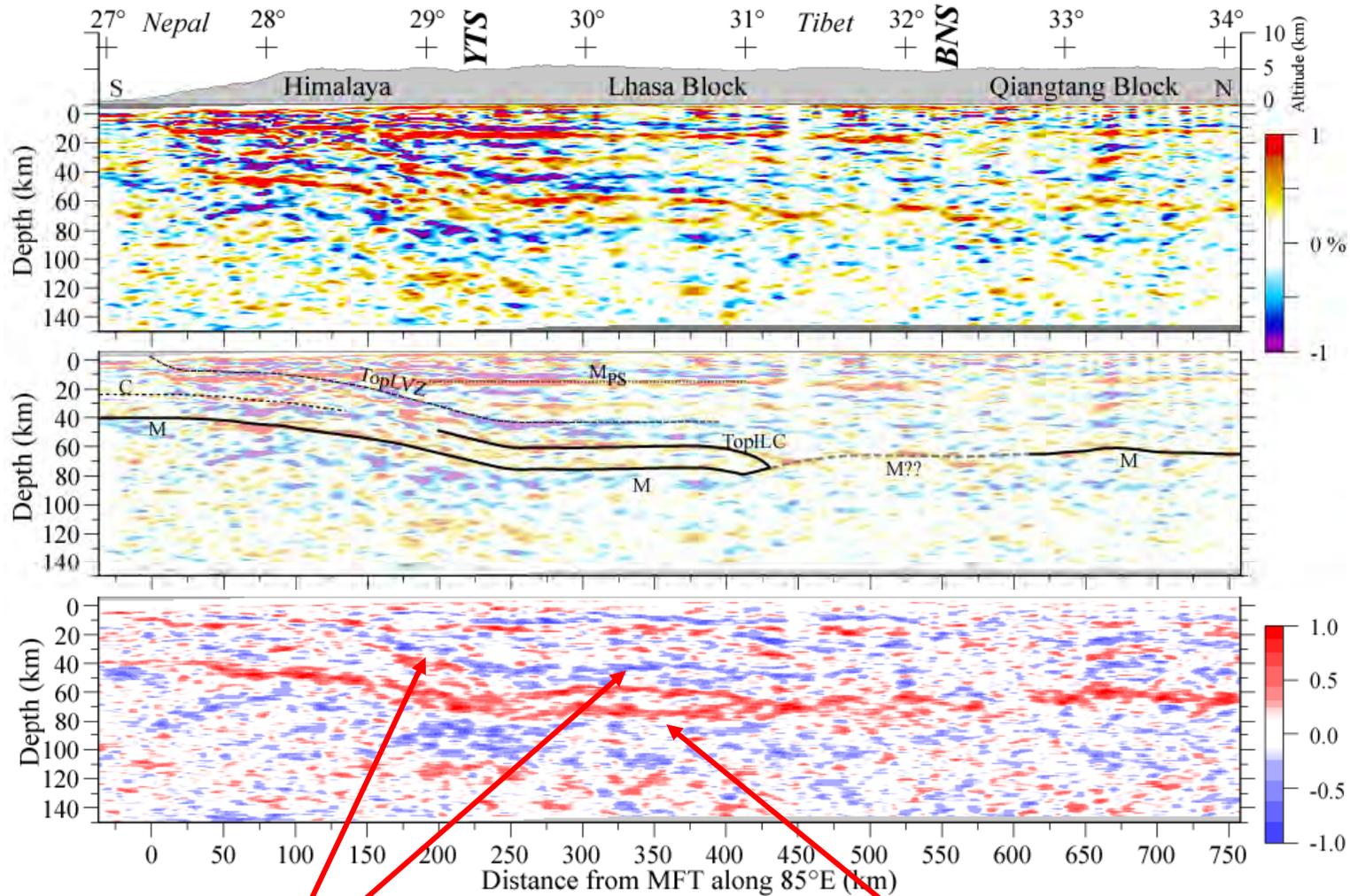
2.3- Imagerie passive par fonctions récepteur: l'expérience Hi-Climb



- sismomètres large-bande
- 3 ans d'enregistrement continu
- 225 sites
- profil de 800 km + sites latéraux
- échantillonnage spatial dense sur le profil principal:
 - 3-5 km Népal + S-Tibet
 - 8-10 km Tibet central

Nabelek et al., Science 2009





- Chevauchement de la croûte tibétaine sur la croûte indienne (MHT) marquée par une zone à moindre vitesse continue jusque sous le bloc de Lhasa

- Interface double sous le bloc de Lhasa: sous-placage et éclogitisation de la croûte inf. indienne

2.4- Imagerie du Moho par fonctions récepteur sous le nord-ouest du Tibet

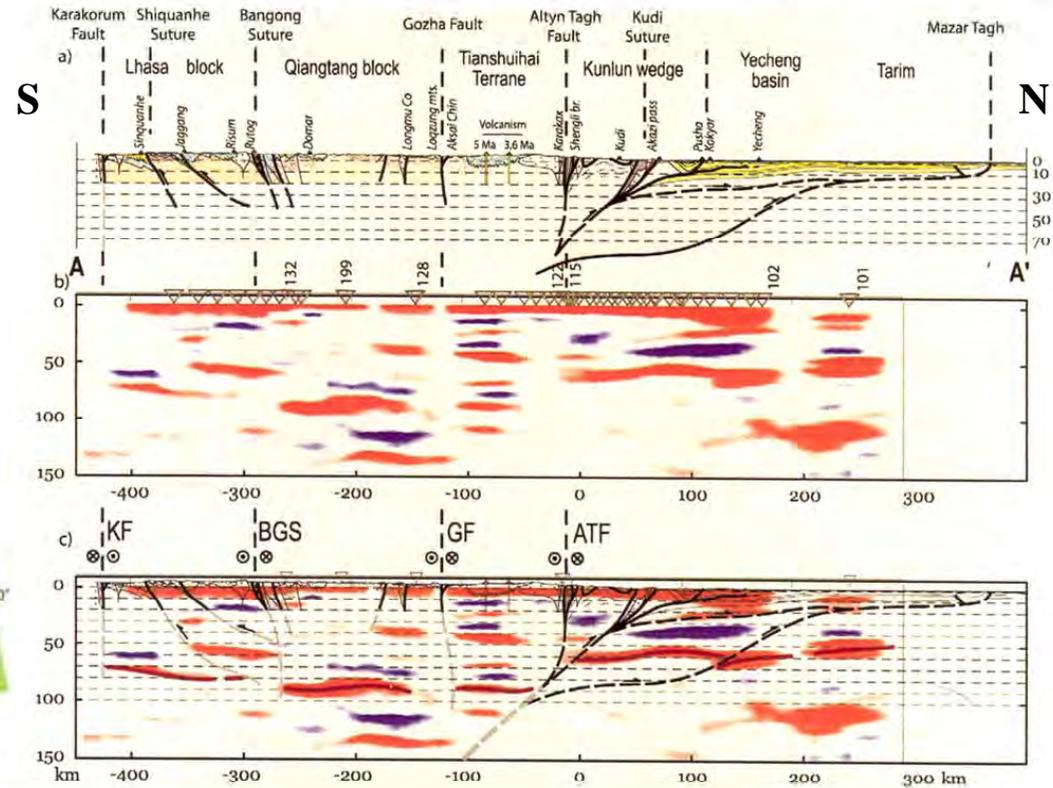


Fig. 4. (a) Tectonic section, simplified from [17], and extended using new 2001 field observations. Cenozoic rocks are shaded yellow. Paleozoic–Mesozoic cover in Tarim, and Mesozoic sediments in Tibet, are light and dark green, respectively. Metamorphic and igneous rocks, including Tarim Proterozoic basement, are pink. Mafic–ultramafic rocks are purple. Basement, including Paleozoic sediments, of different Tibetan blocks is shown with distinct ochre shades, as in Fig. 1. (b) High frequency (0.1–1 Hz) CCP-migrated RRF section of lithosphere along AA', with same color code as in Fig. 1. Note ~10 km 'thick' Moho beneath certain stations (e.g., 101, 199). (c) Inferred extrapolation at depth of main, likely deep-rooted features of tectonic section, and shallow part of 45°S-dipping velocity boundary in tomogram of Fig. 9, overlaid on RRF section. Moho is underlined.

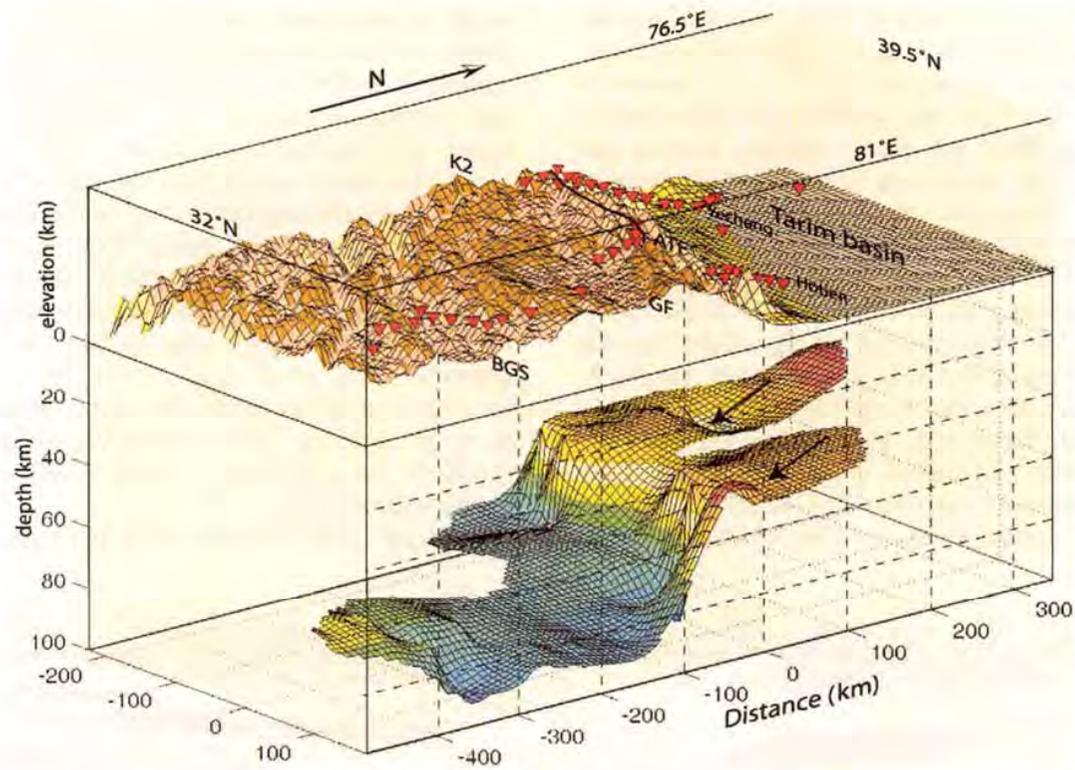


Fig. 6. 3D view of Moho topography deduced from Ps conversions. CCP-migrated image (Fig. 4) is first sliced into narrow, 40 km wide, north-south strips with 20 km overlap. Within each strip, Moho coherence is then used to better pick Ps conversion depths, which are plotted using only slight horizontal smoothing. Surface relief is from Etopo5 DEM with vertical exaggeration of 4. Red triangles indicate locations of seismic stations. Black arrows point to Moho kink beneath Yecheng.

Synthèse sur la structure crustale du Tibet

- Croûte extrêmement épaisse: Moho vers 75 km de profondeur Moho assez continu et ~horizontal au Sud

- indices convergents d'un sous-placage de croûte (lithosphère) indienne sous le Tibet jusqu'à ~450 km au Nord du front Himalayen
le manteau sous le Tibet est globalement rapide (\Rightarrow froid), à l'exception de quelques zones d'extension limitée (nord-ouest, centre)

\Rightarrow pas de délamination globale du manteau lithosphérique tibétain

\Rightarrow pas de panache asthénosphérique chaud sous le Tibet

les grandes failles décrochantes (anciennes sutures) s'enracinent dans le manteau lithosphérique (ex. faille de l'Altyn Tagh)

au Nord du plateau, indices de subduction vers le Sud du manteau lithosphérique asiatique

Depuis quand le Plateau existe t-il ??

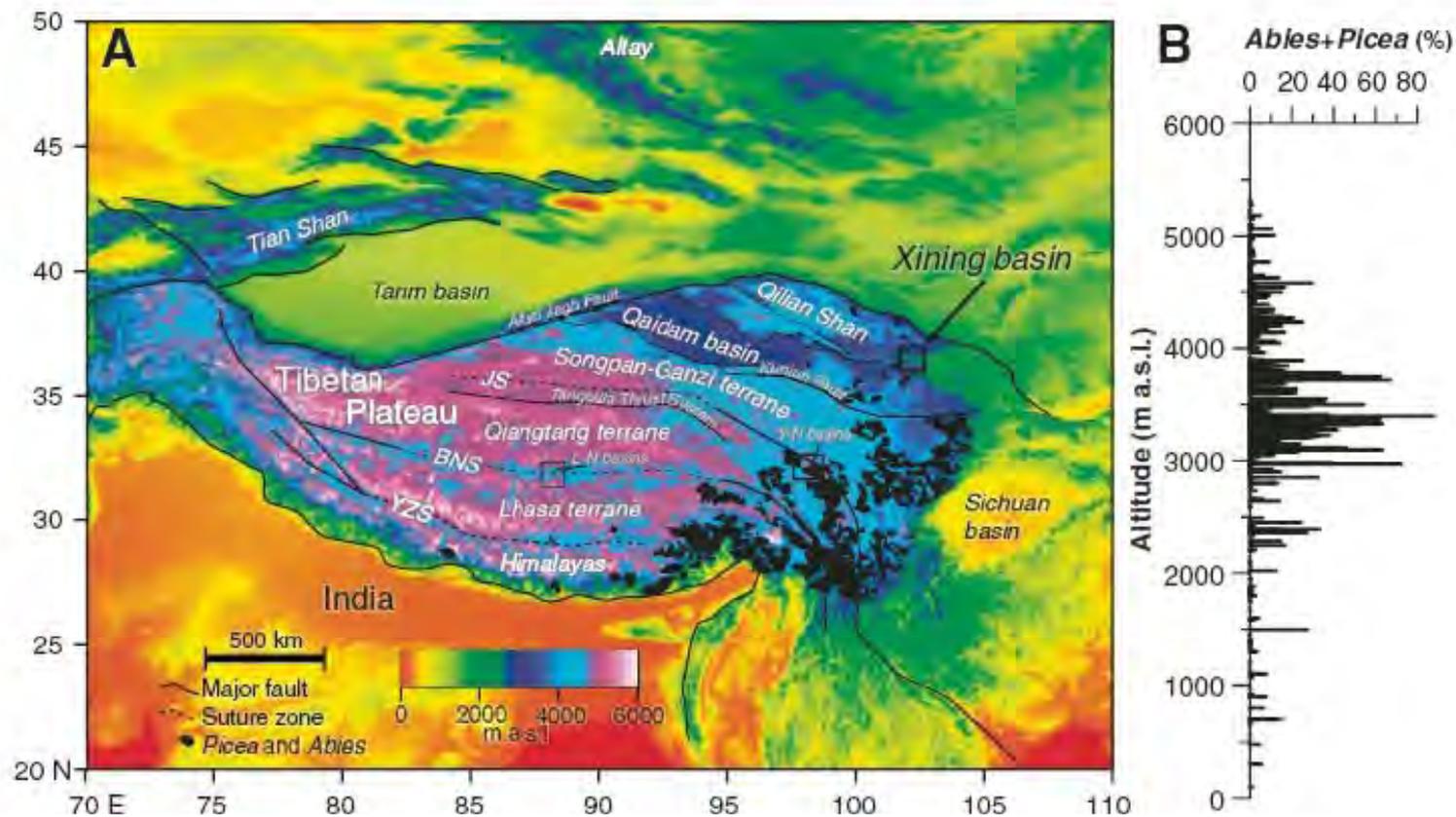
~~Modèle d'épaississement homogène avec délamination de la racine : < 10 Ma~~

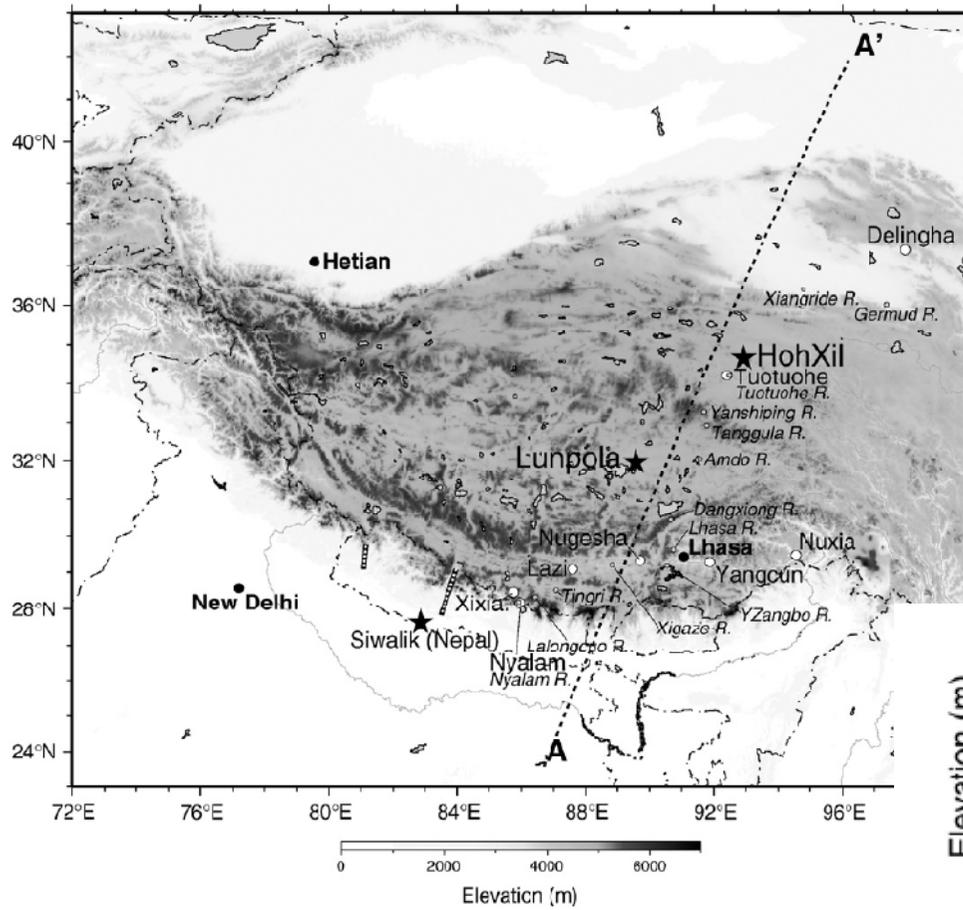
Modèle de sous placage de la lithosphère Indienne

=> propagation du plateau vers le nord depuis le début de la collision

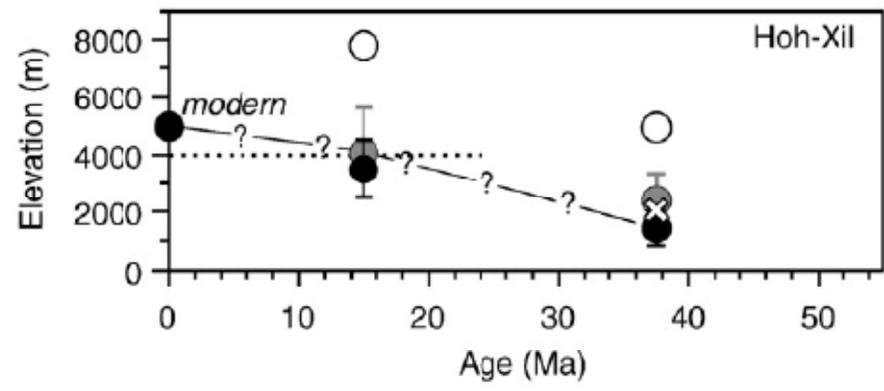
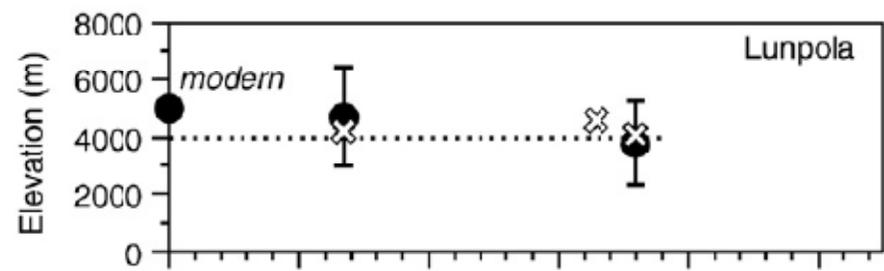
Tibetan uplift prior to the Eocene-Oligocene climate transition: Evidence from pollen analysis of the Xining Basin

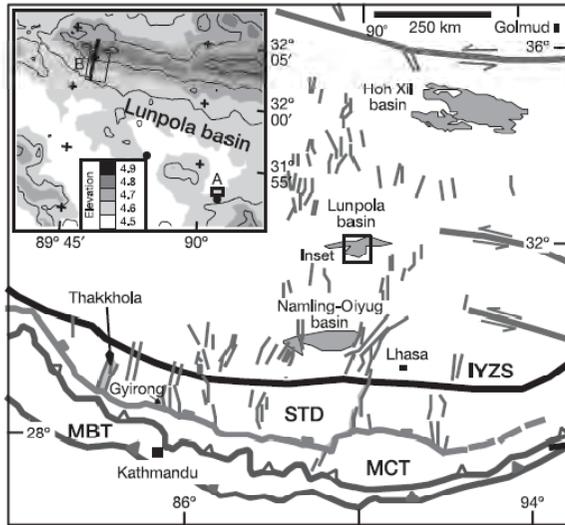
G. Dupont-Nivet^{1*}, C. Hoorn², M. Konert³ *Geology*, 2008



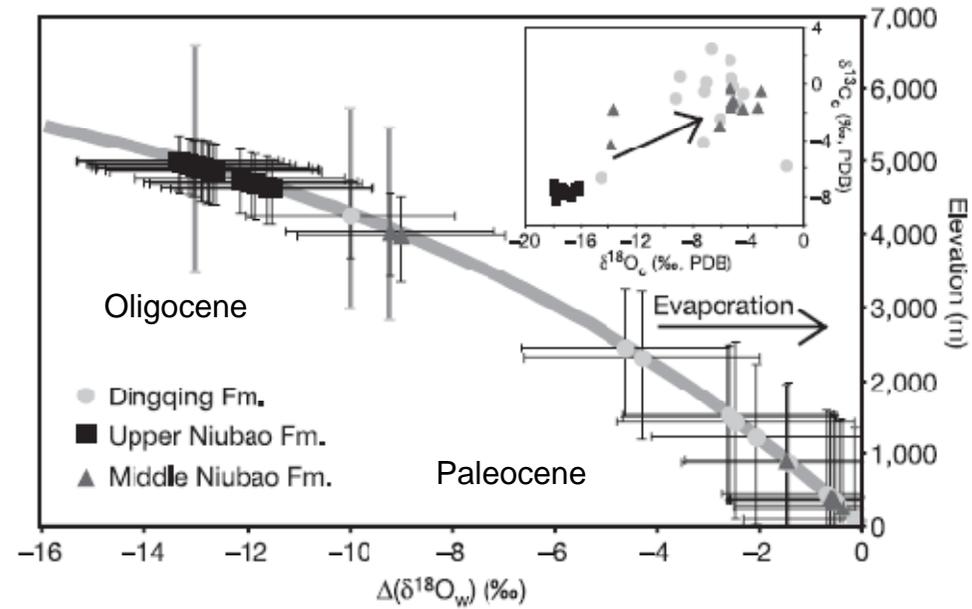


D/H restes de plantes





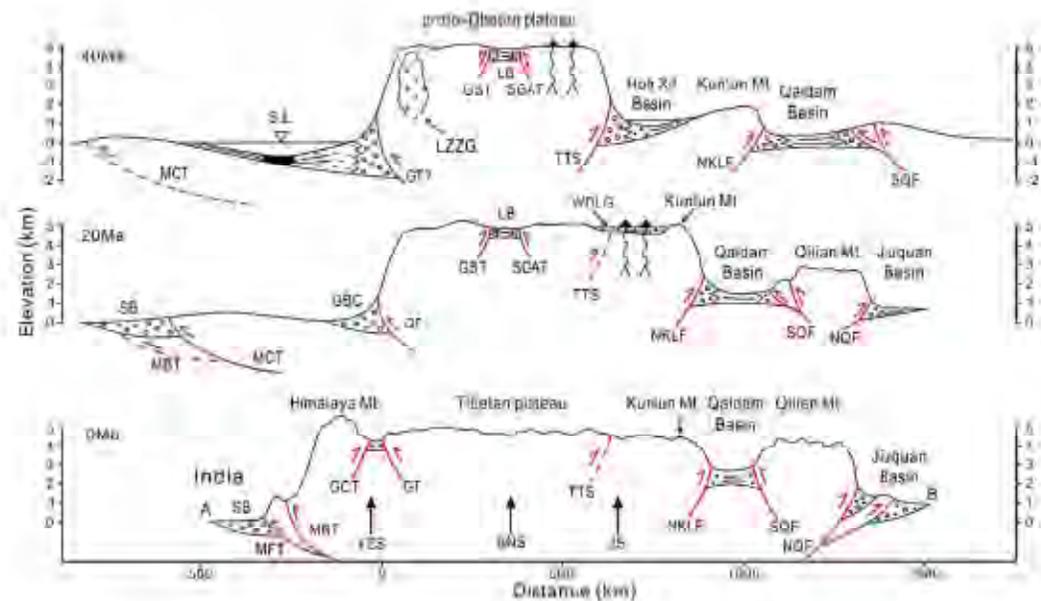
Rowley et Currie, Nature, 2006



Constraints on the early uplift history of the Tibetan Plateau

Chengshan Wang^{††}, Xixi Zhao^{††}, Zhifei Liu[§], Peter C. Lippert[‡], Stephan A Lidong Zhu[†], Shun Liu[†], and Yalin Li^{*}

PNAS, 2008



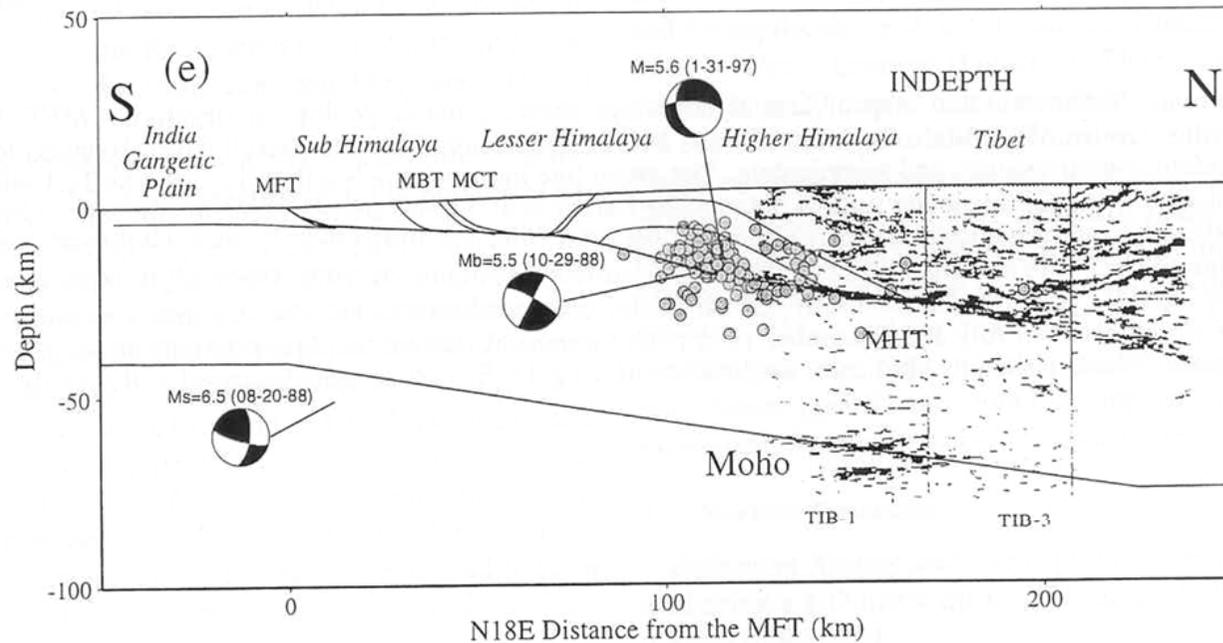
Quand est il des reliefs en Himalaya

L'Himalaya : Prisme orogénique

=> croissance progressive des reliefs ?

ou démantèlement du plateau ?

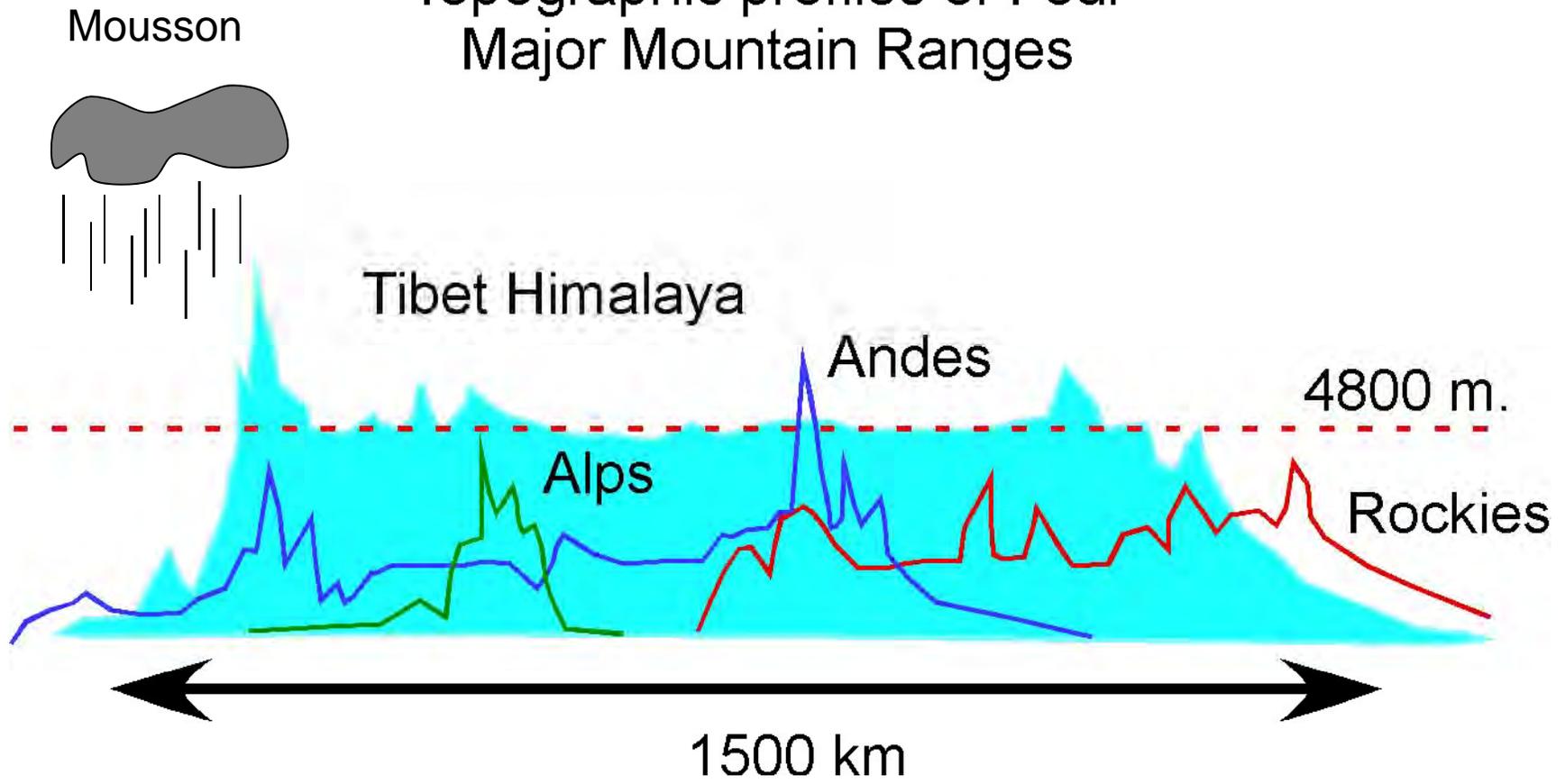
Himalaya : Prisme orogénique

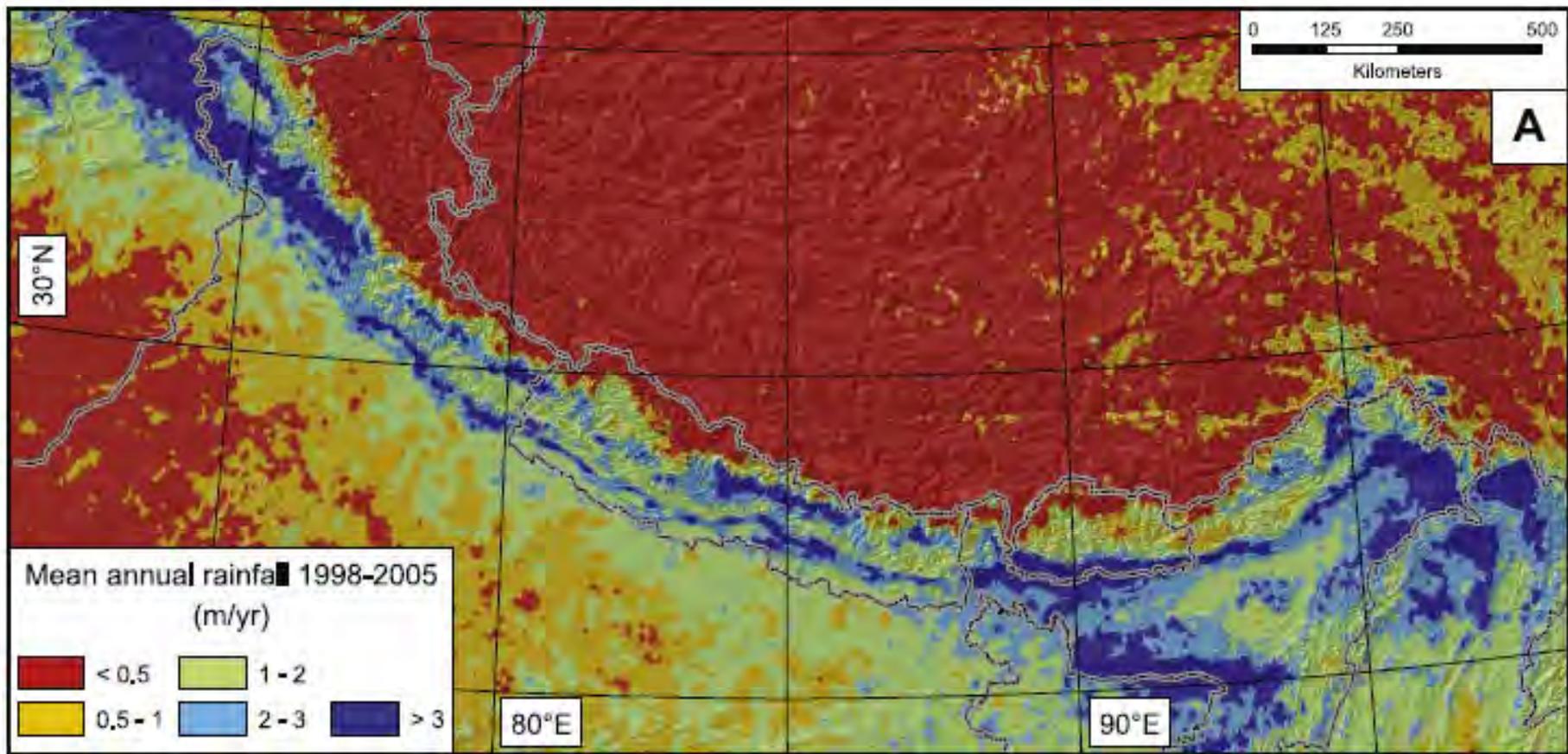


(Cattin & Avouac *JGR*, 2000)

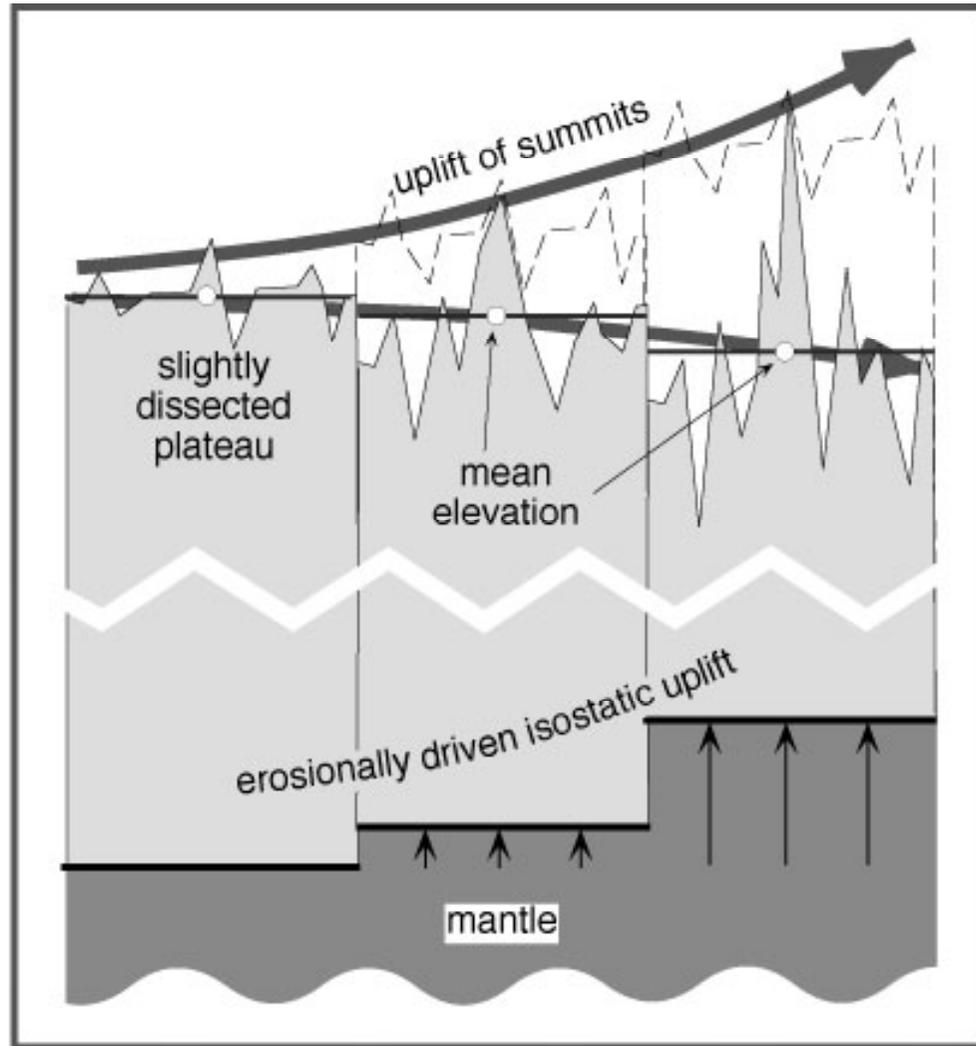
- la croûte indienne intacte « sous-chevauche » le Haut-Himalaya et le sud-Tibet le long d'un chevauchement d'échelle crustale, le MHT;
- au-dessus du MHT: prisme d'accrétion crustal formé d'écaillés imbriquées de couverture sédimentaire et de socle cristallin arrachées à la marge indienne pendant la collision

Topographic profiles of Four Major Mountain Ranges

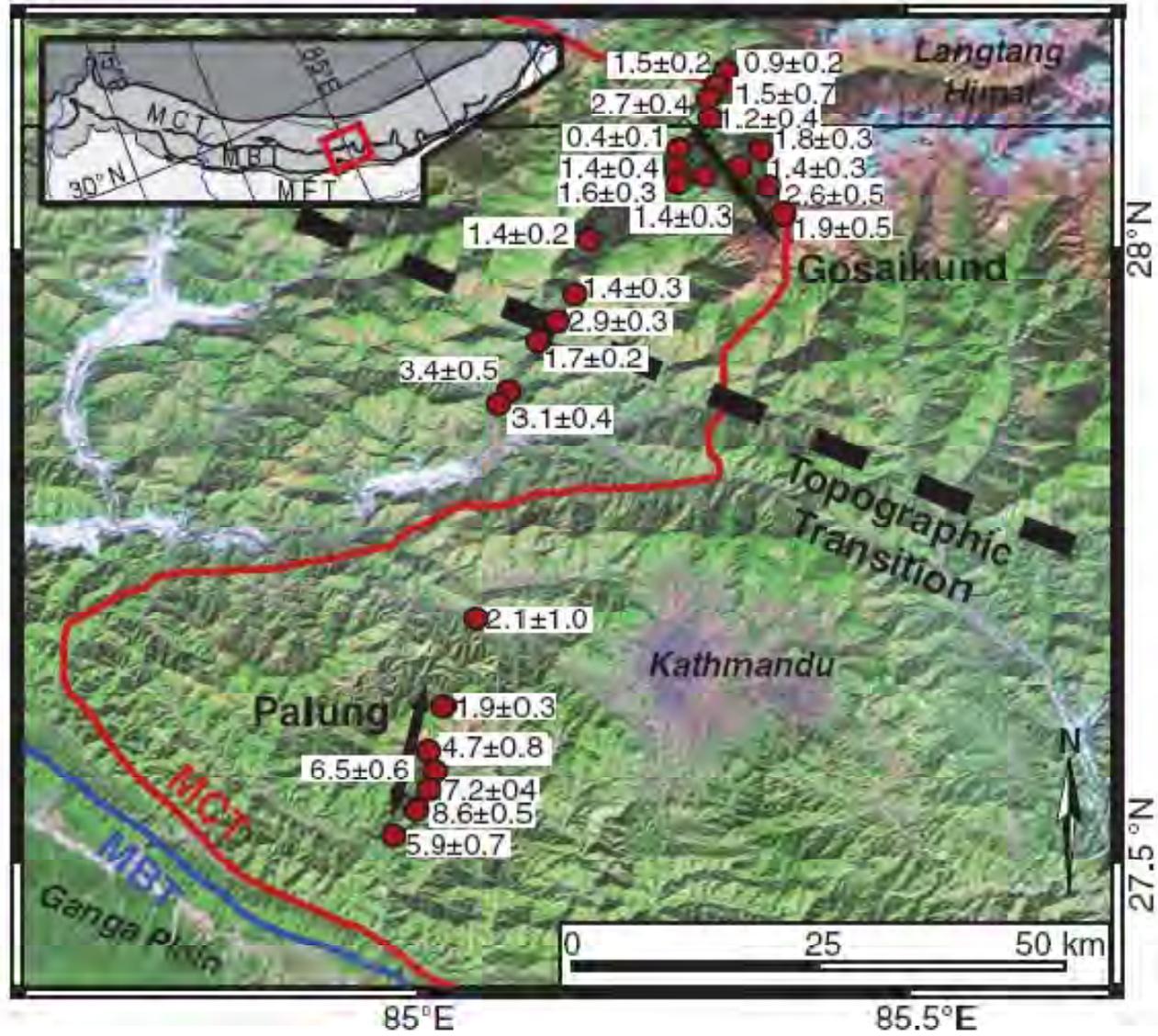


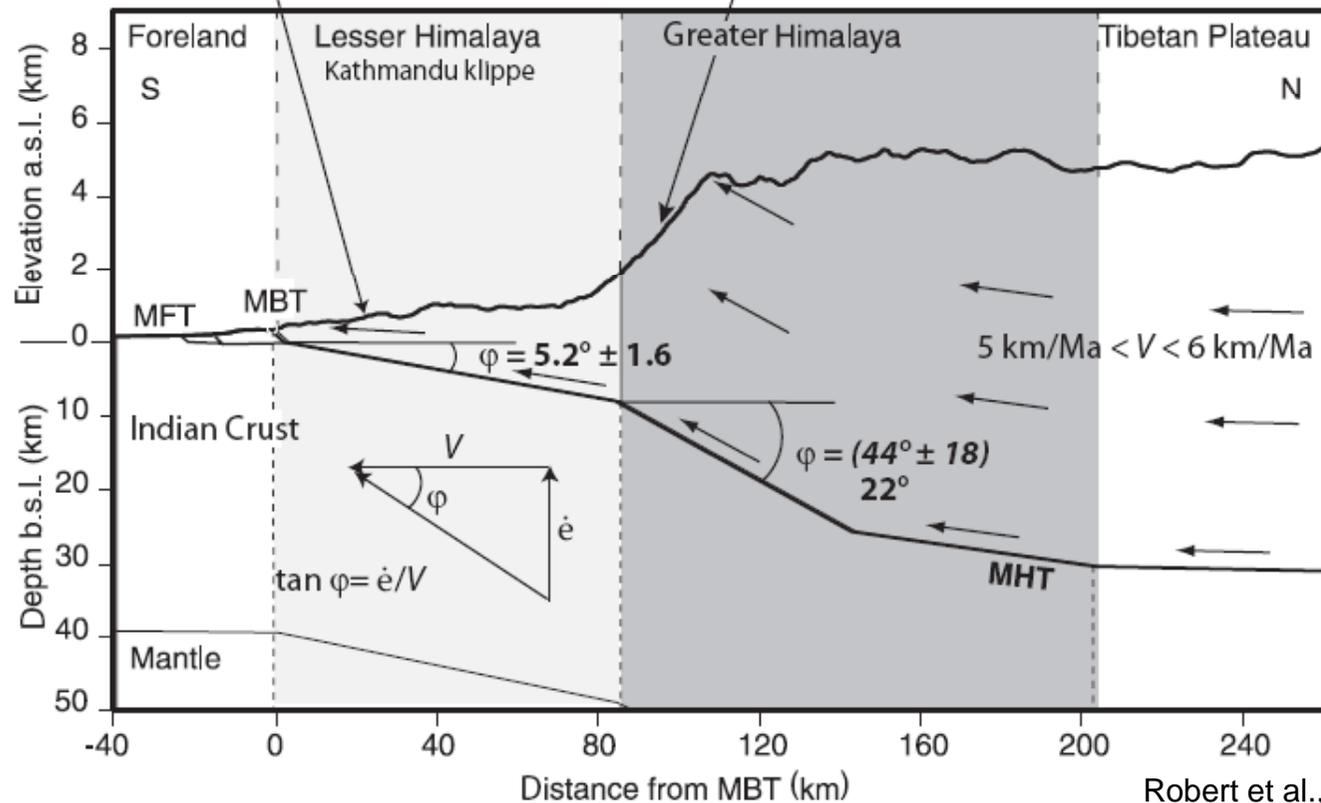
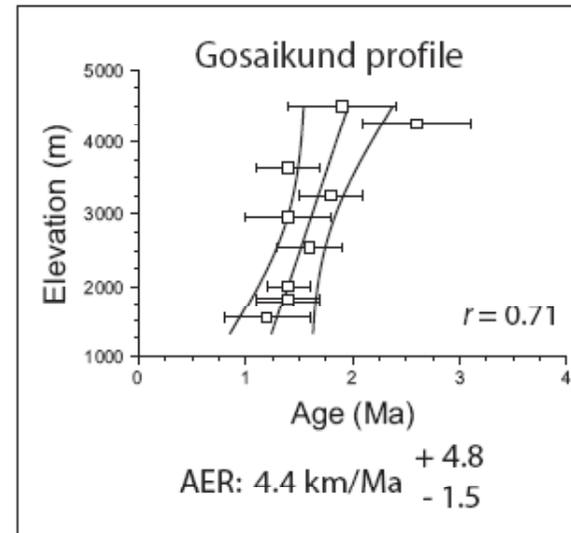
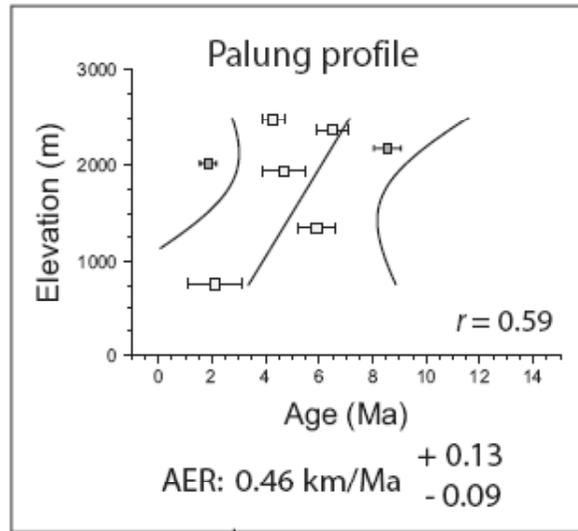


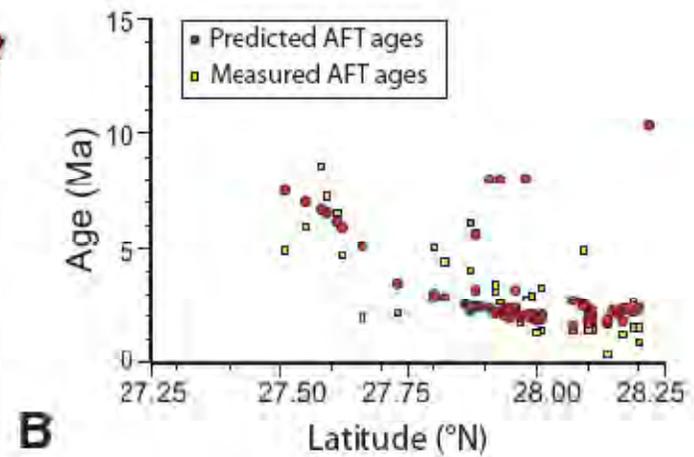
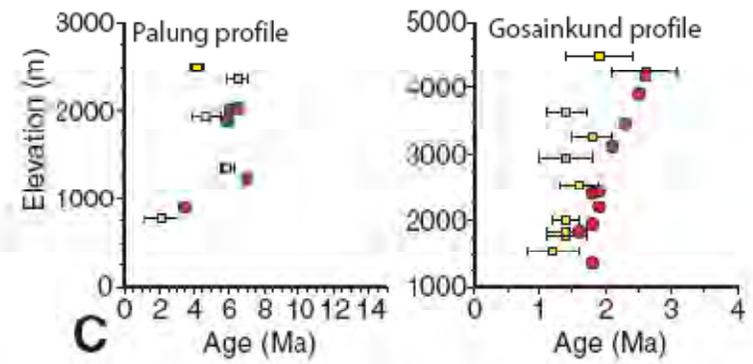
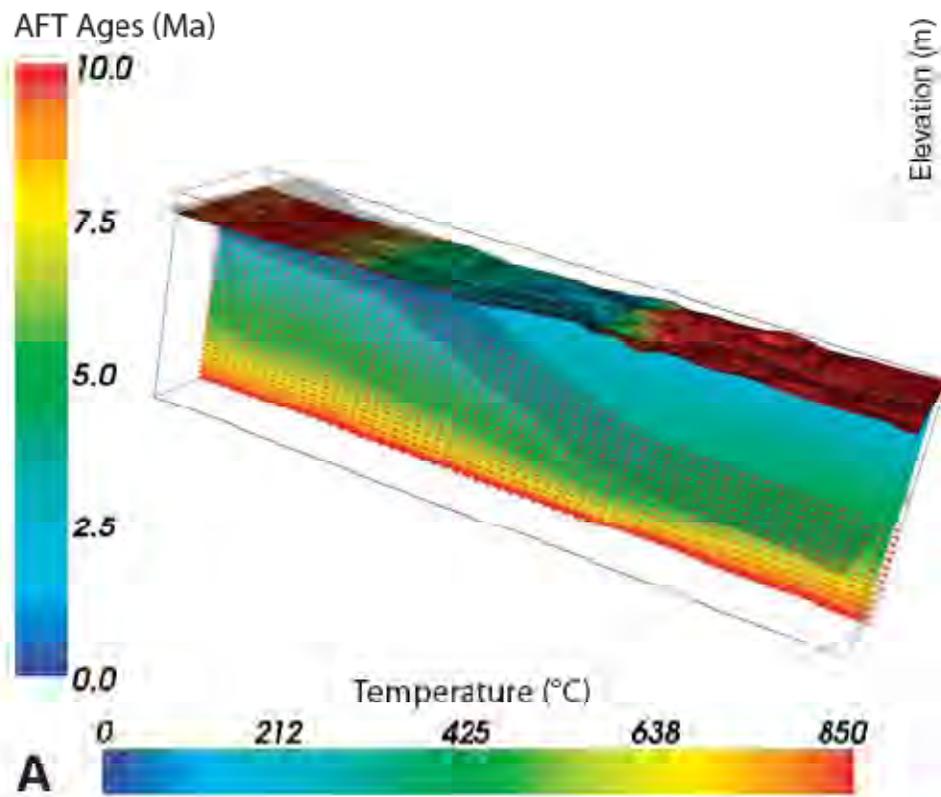
Dénudation, soulèvement et relief

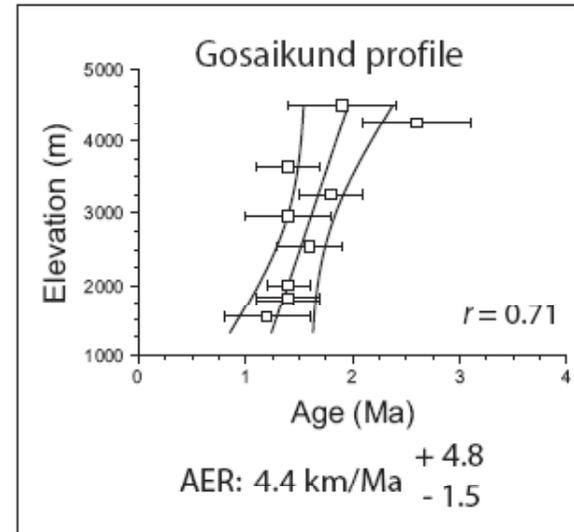
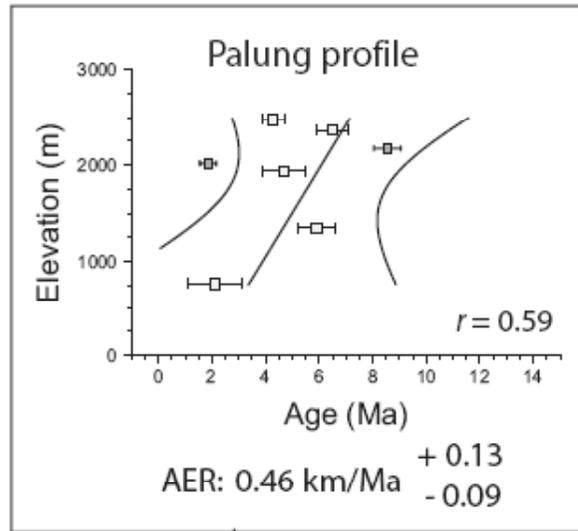


*Burbank & Anderson, 2001
d'après Montgomery, JGR, 1994*

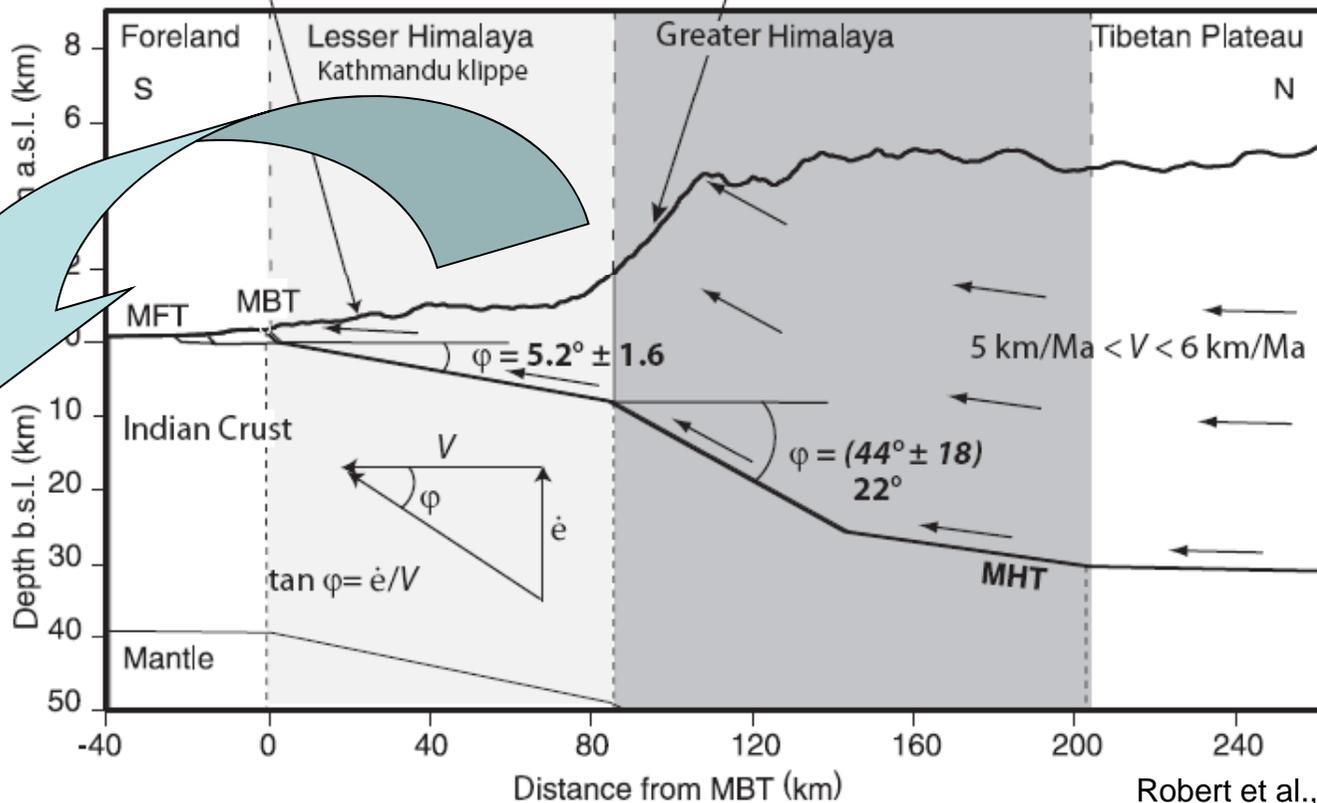
A

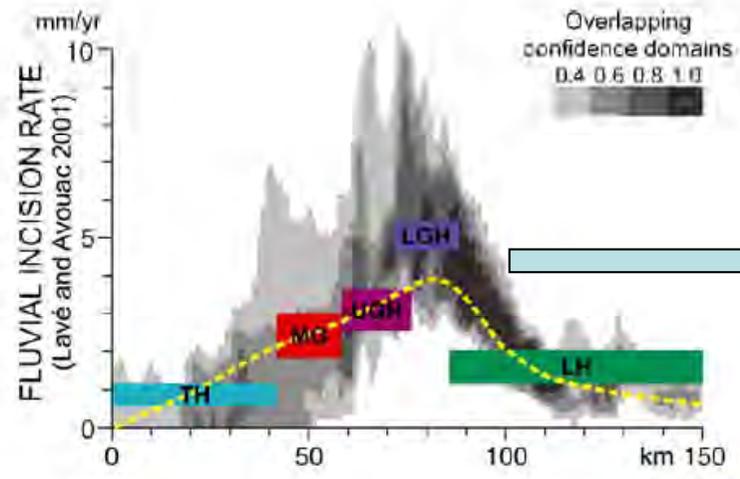




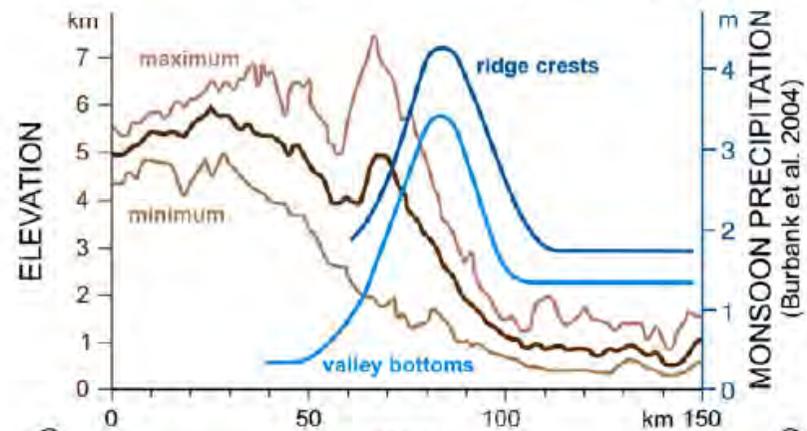


Erosion
5 mm/an

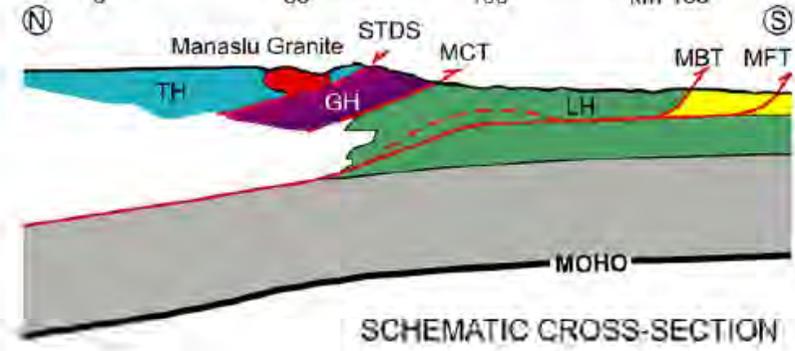




4-5 mm/an d'incision



Dénudation = Erosion
depuis au moins 7 Ma



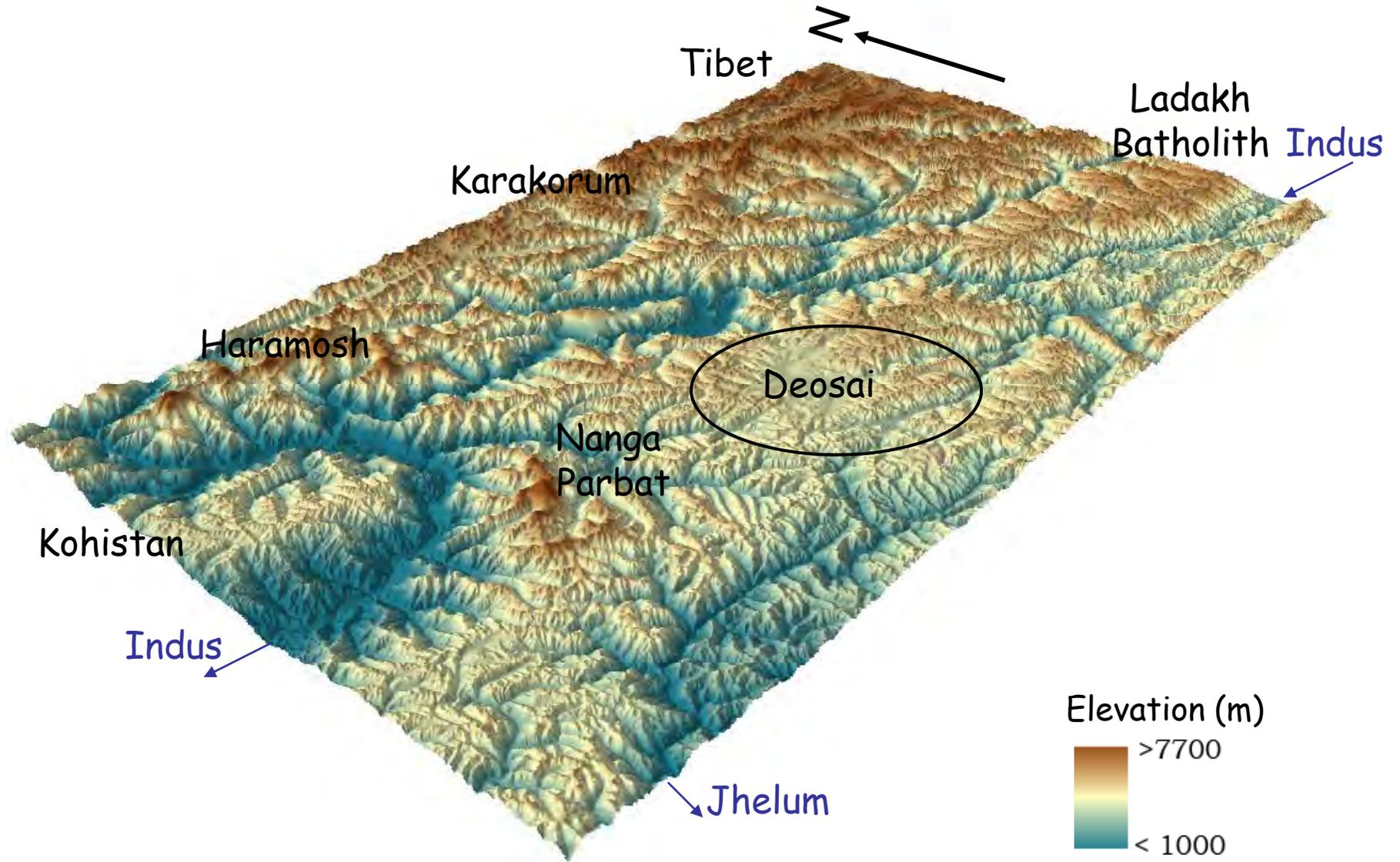
⇒ Les reliefs Himalayens ont au moins 7 Ma

Qu'en est il à plus long terme ??

NW Himalaya



NW Himalaya



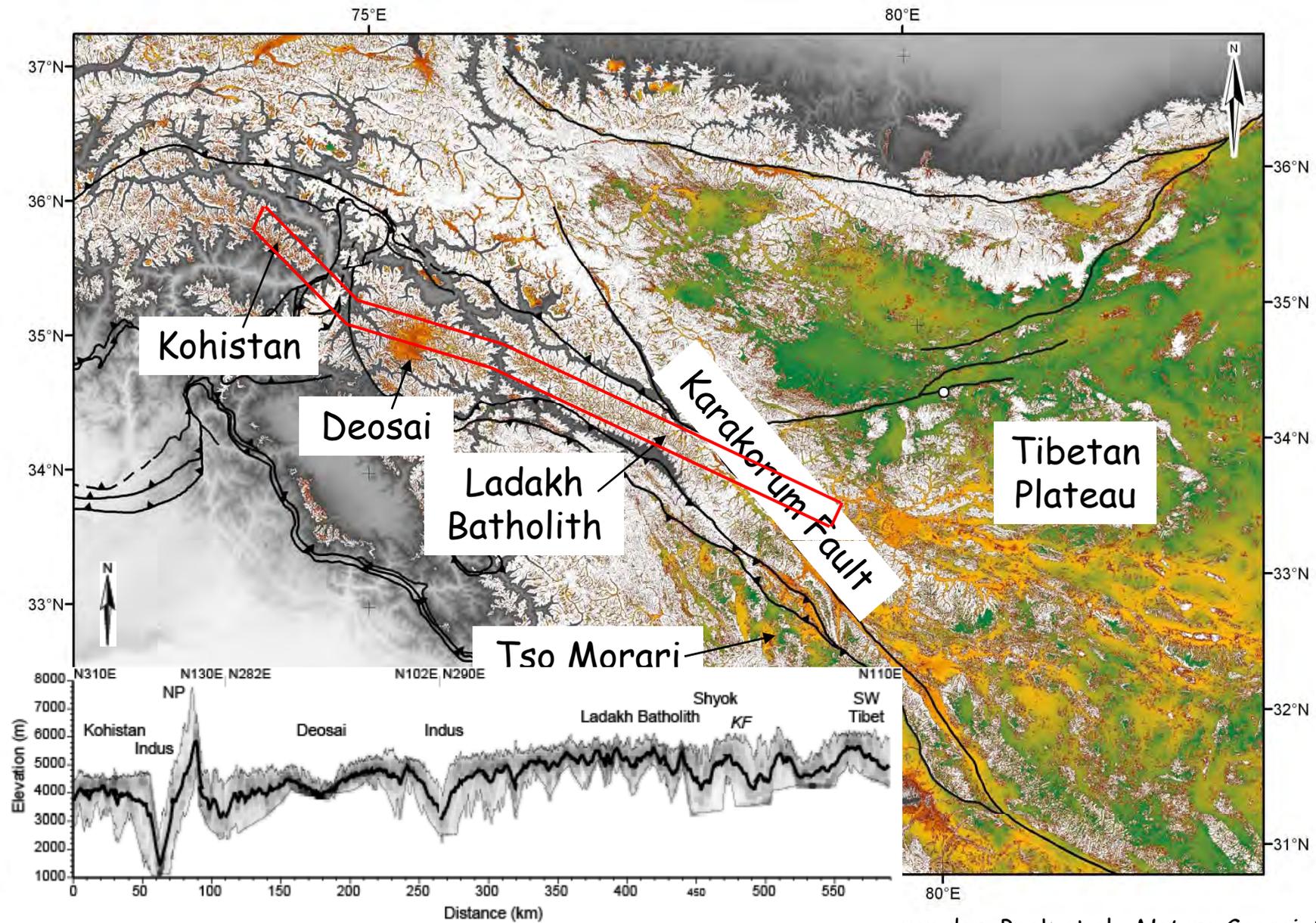
High-elevation low-relief surfaces in NW Himalaya

- Elevation threshold: > 3800 m
- Slope threshold : $< 17^\circ$
- Eliminate ice-covered surfaces (Landsat imagery)

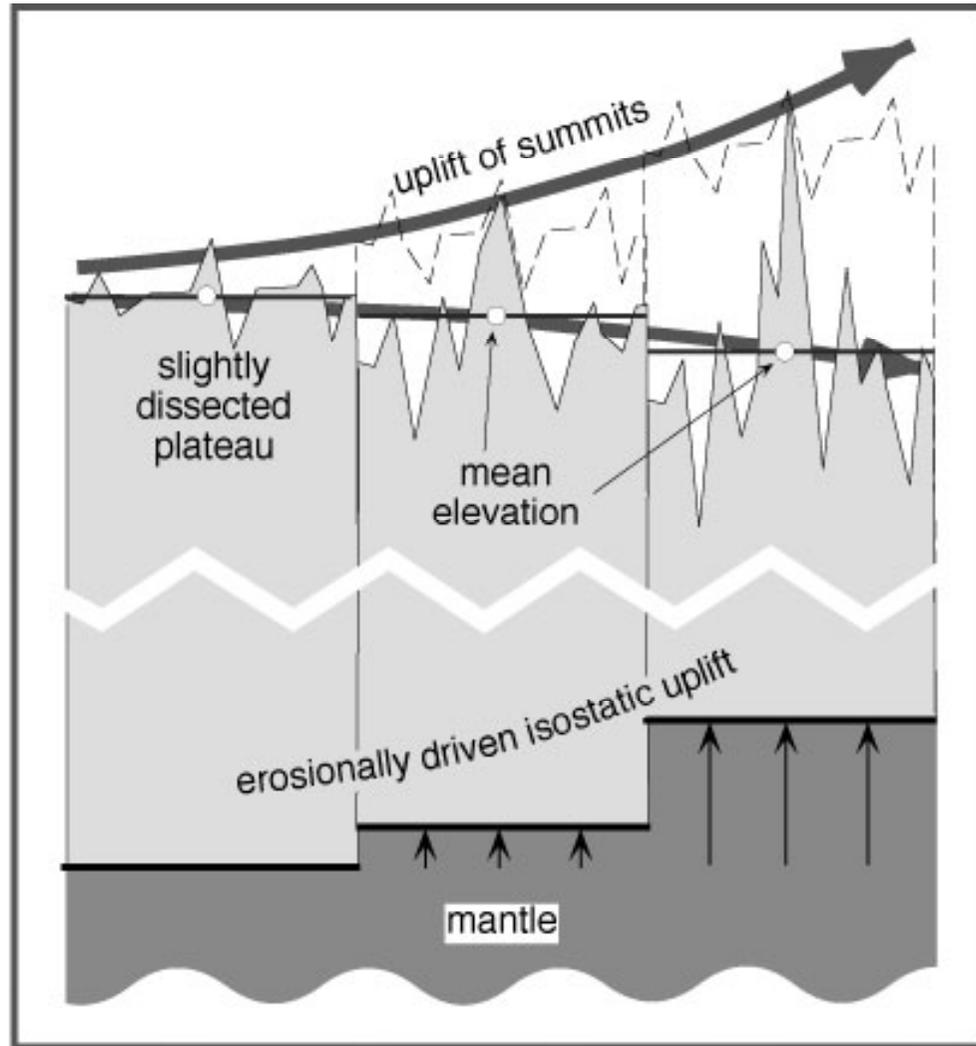
Deosai Plateau - N Pakistan



High-elevation low-relief surfaces in NW Himalaya

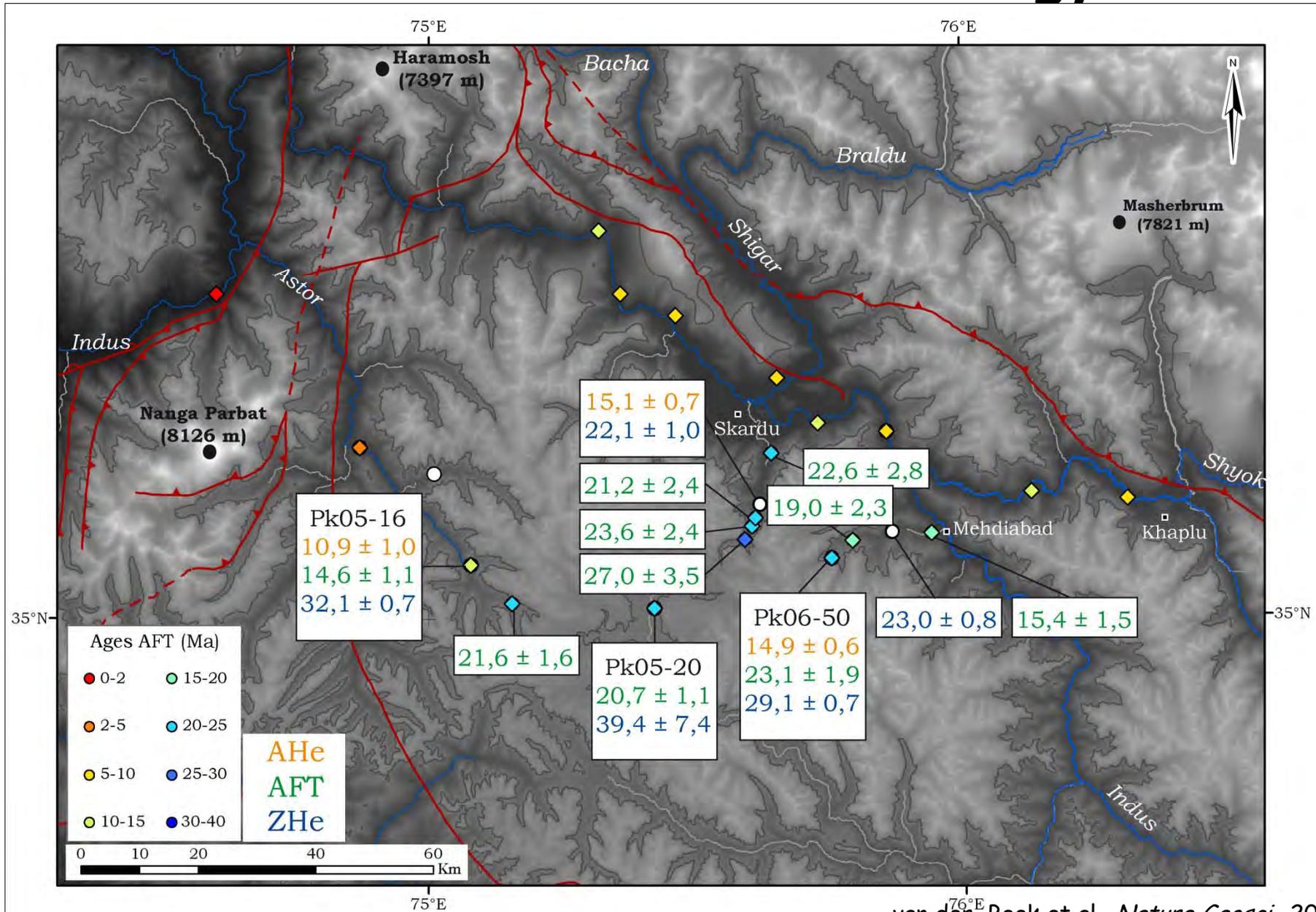


Dénudation, soulèvement et relief

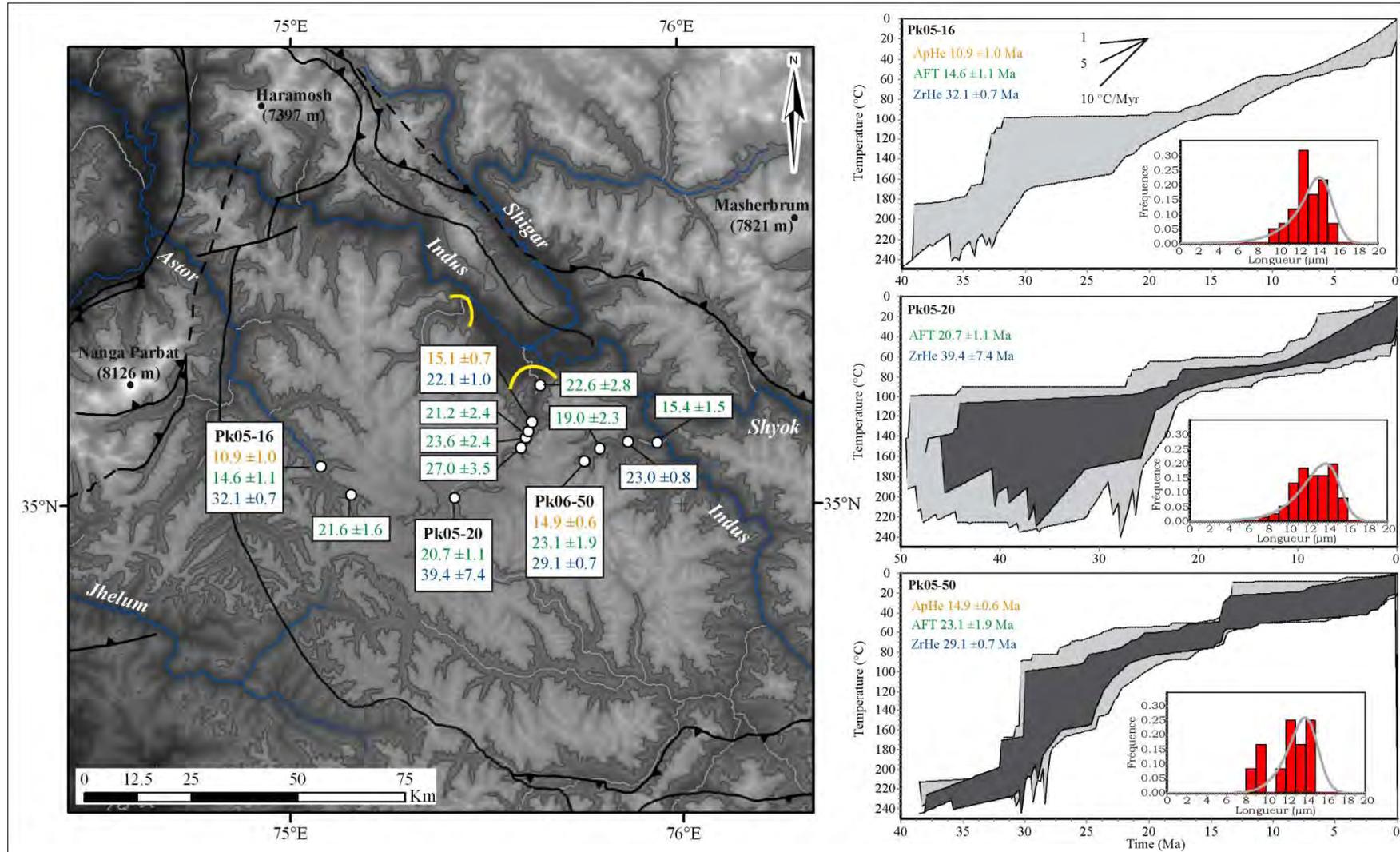


*Burbank & Anderson, 2001
d'après Montgomery, JGR, 1994*

Deosai Plateau - thermochronology data

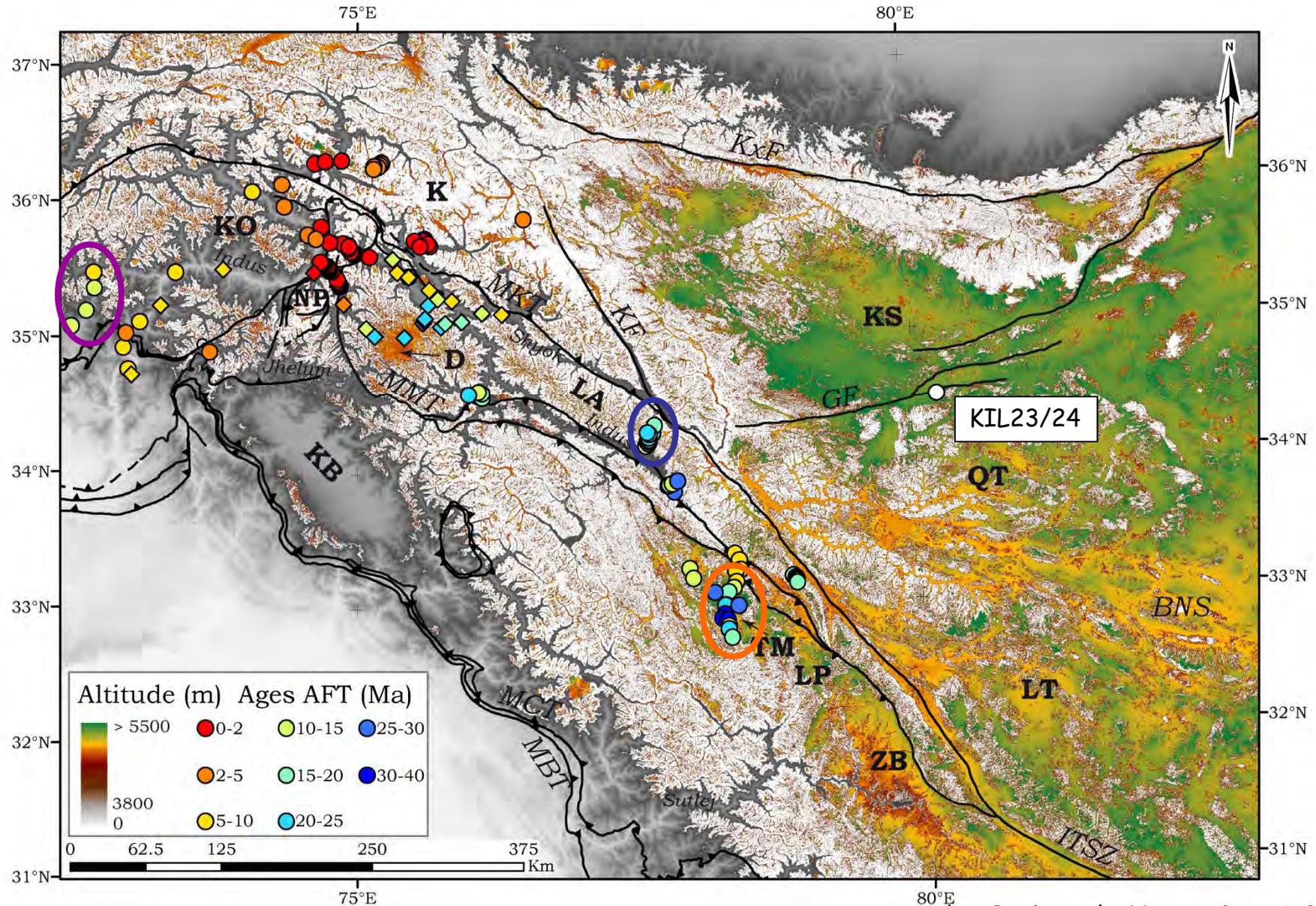


Deosai Plateau - thermochronology data

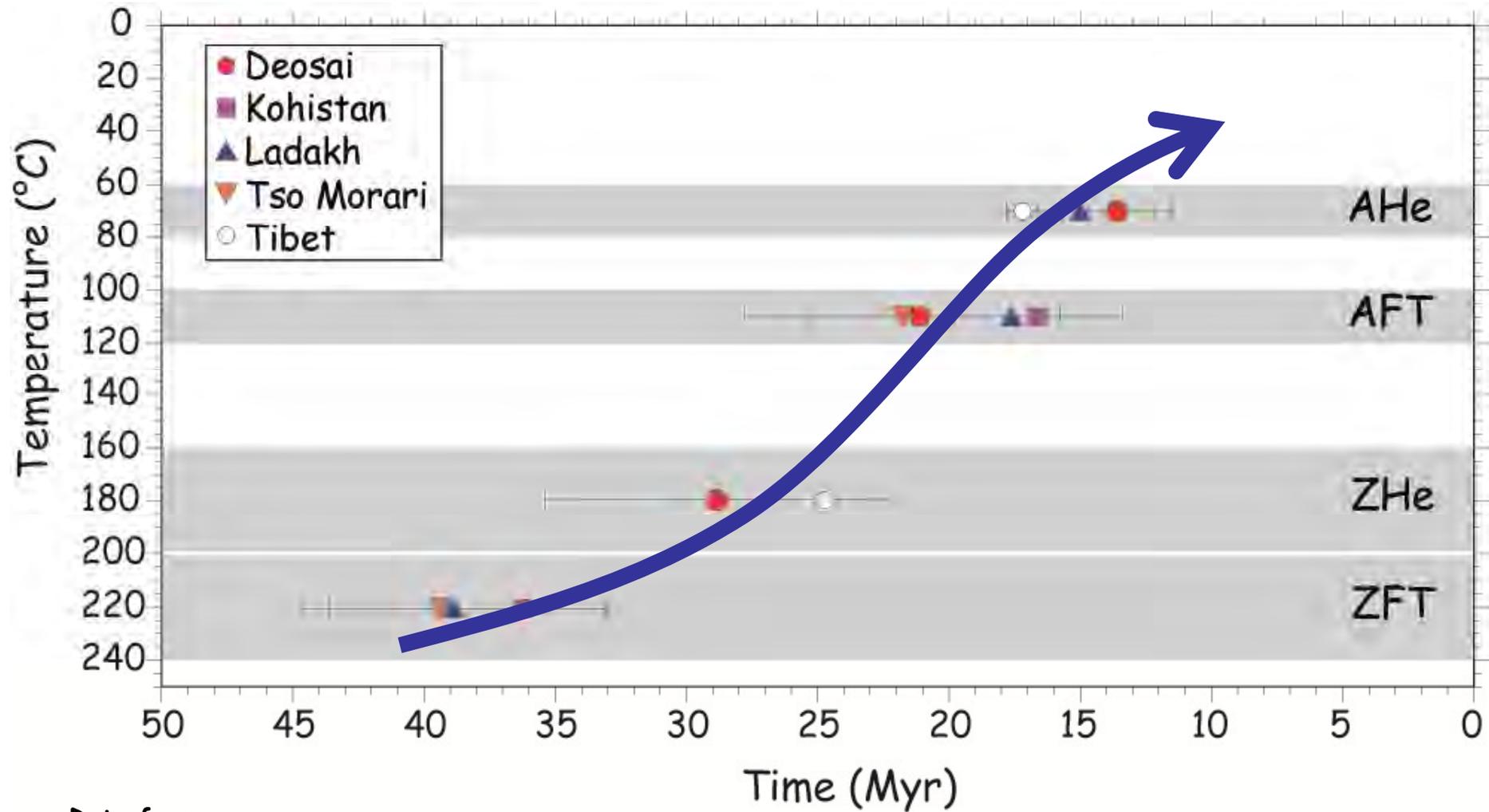


=> Vitesse de dénudation < 0.25 mm/an

Comparison with other HE-LR regions



Comparison with other HE-LR regions



Data from:

Zeitler, *Tectonics*, 1985

Kumar et al., *Curr. Sci.*, 2007

Kirstein et al., *J. Geol. Soc.*, in press

Schlup et al., *J. Geol. Soc.*, 2003

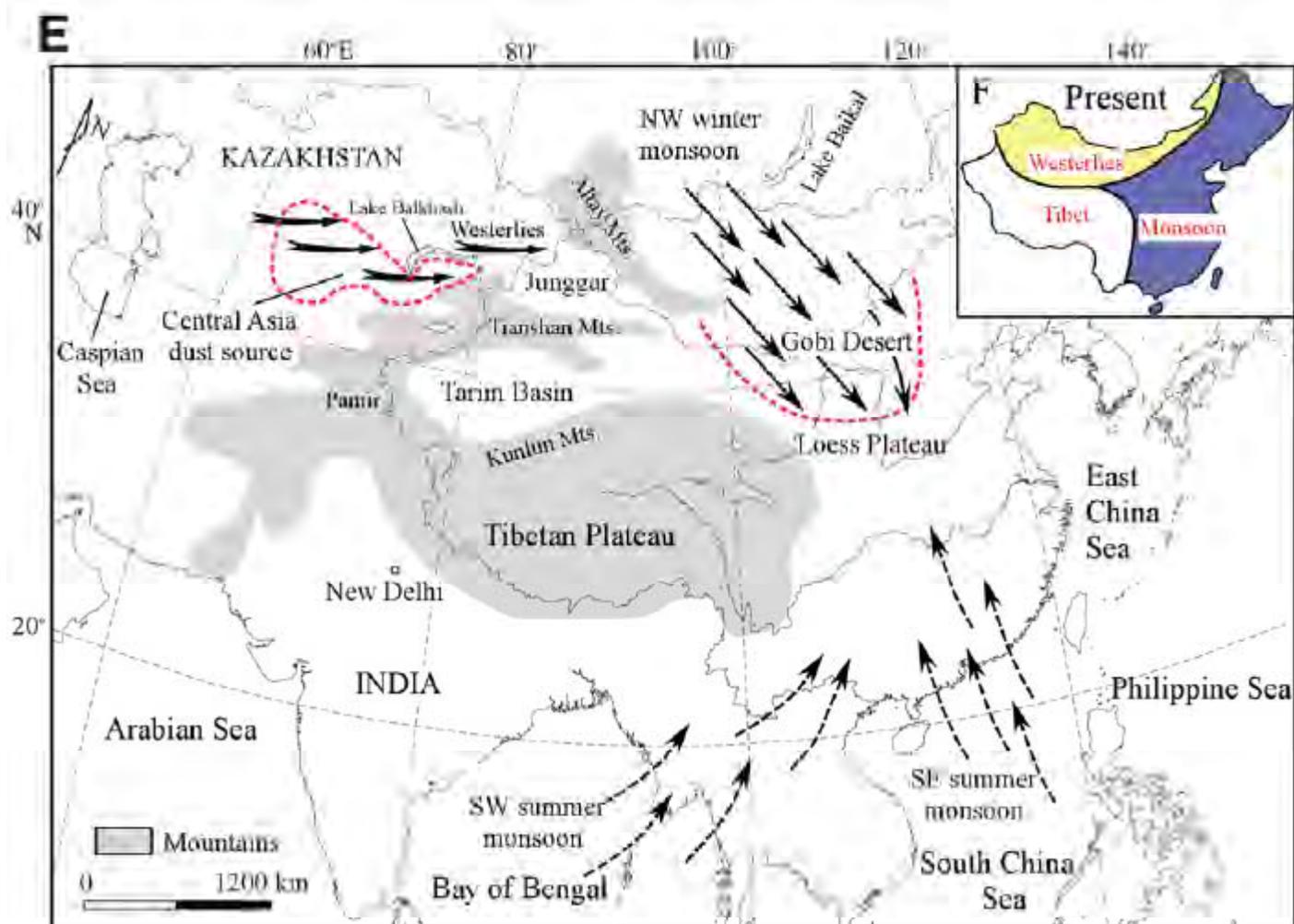
van der Beek et al.,
Nature Geosci., 2009

Implications

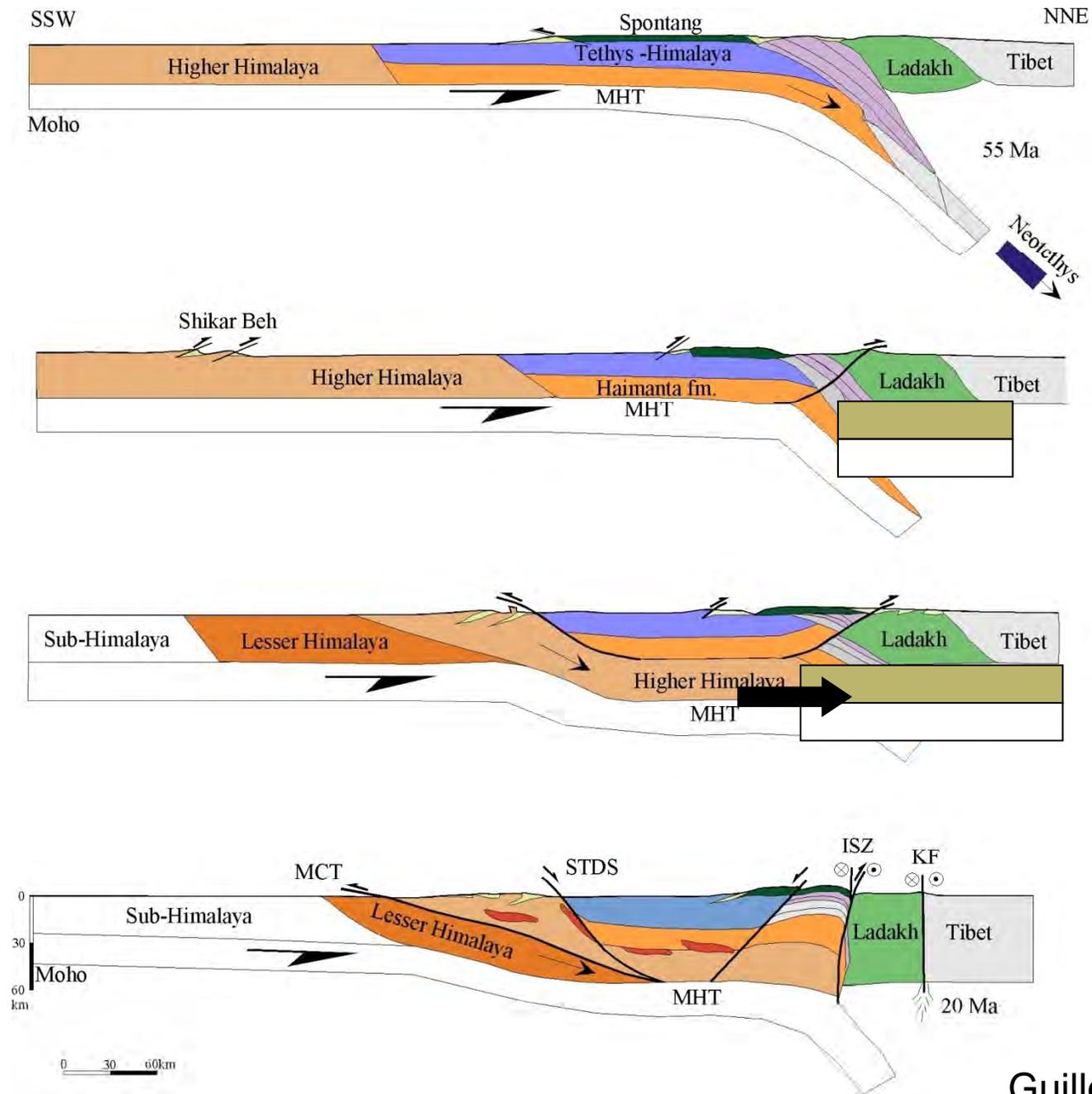
- La continuité morphologique et des histoires d'exhumation similaires des surfaces d'altitude dans le NW Himalaya avec le Tibet suggère que ces régions représentent des buttes témoins du Plateau Tibétain Eocène



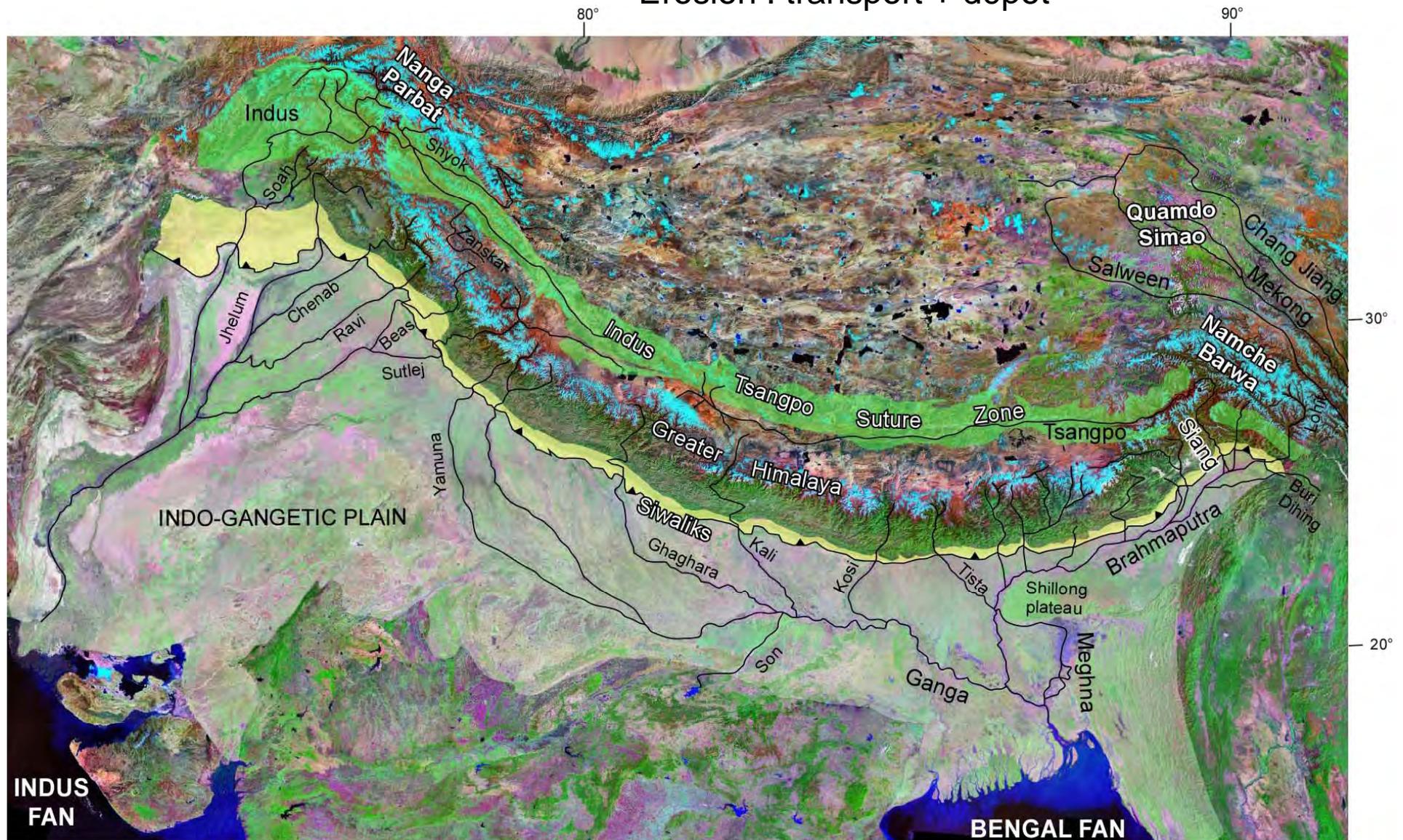
After Tapponnier et al., *Science*, 2001



By 24 Ma the Loess drainage system suggests that the northern Tibetan Plateau was present



Erosion : transport + dépôt



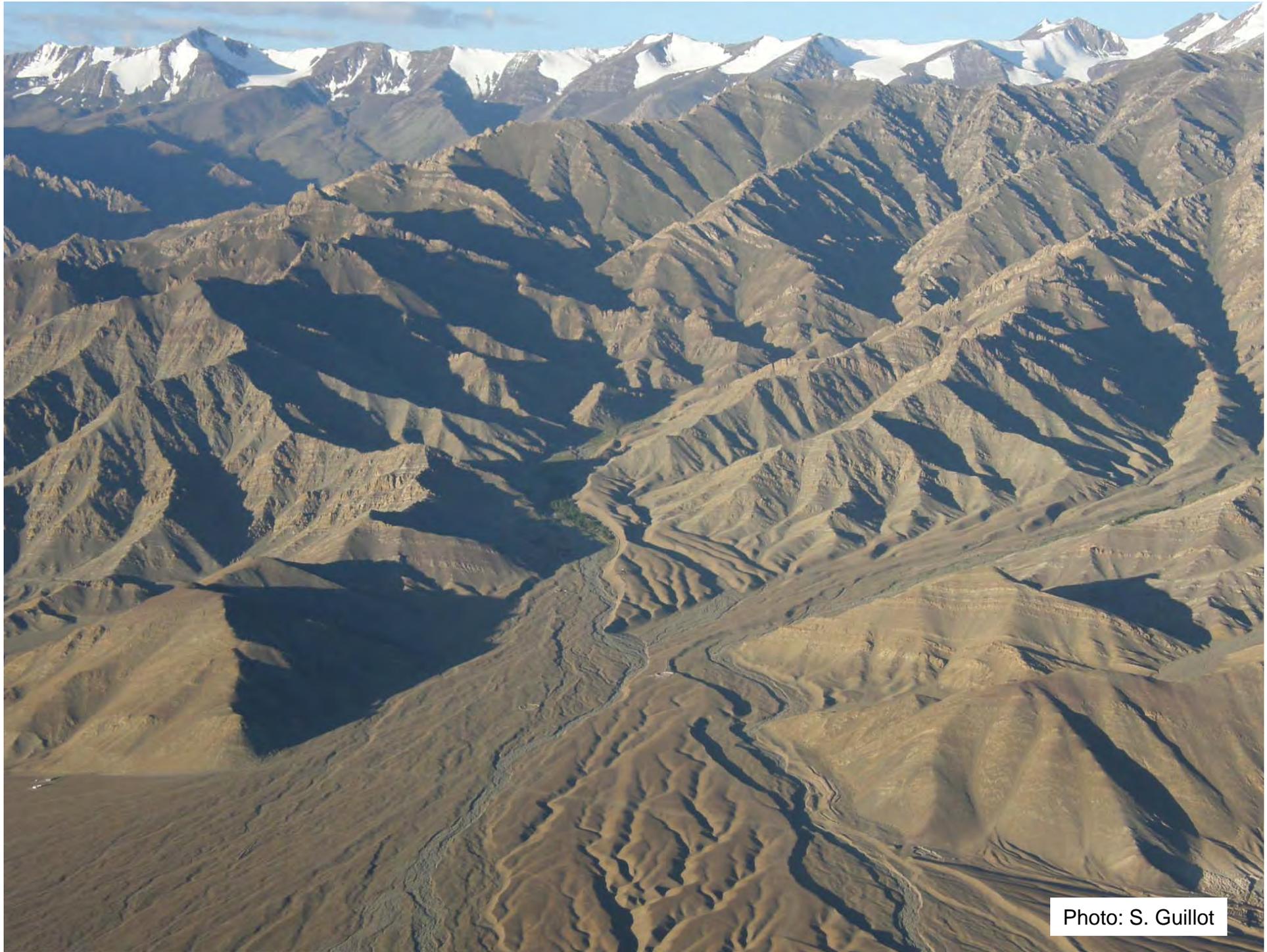
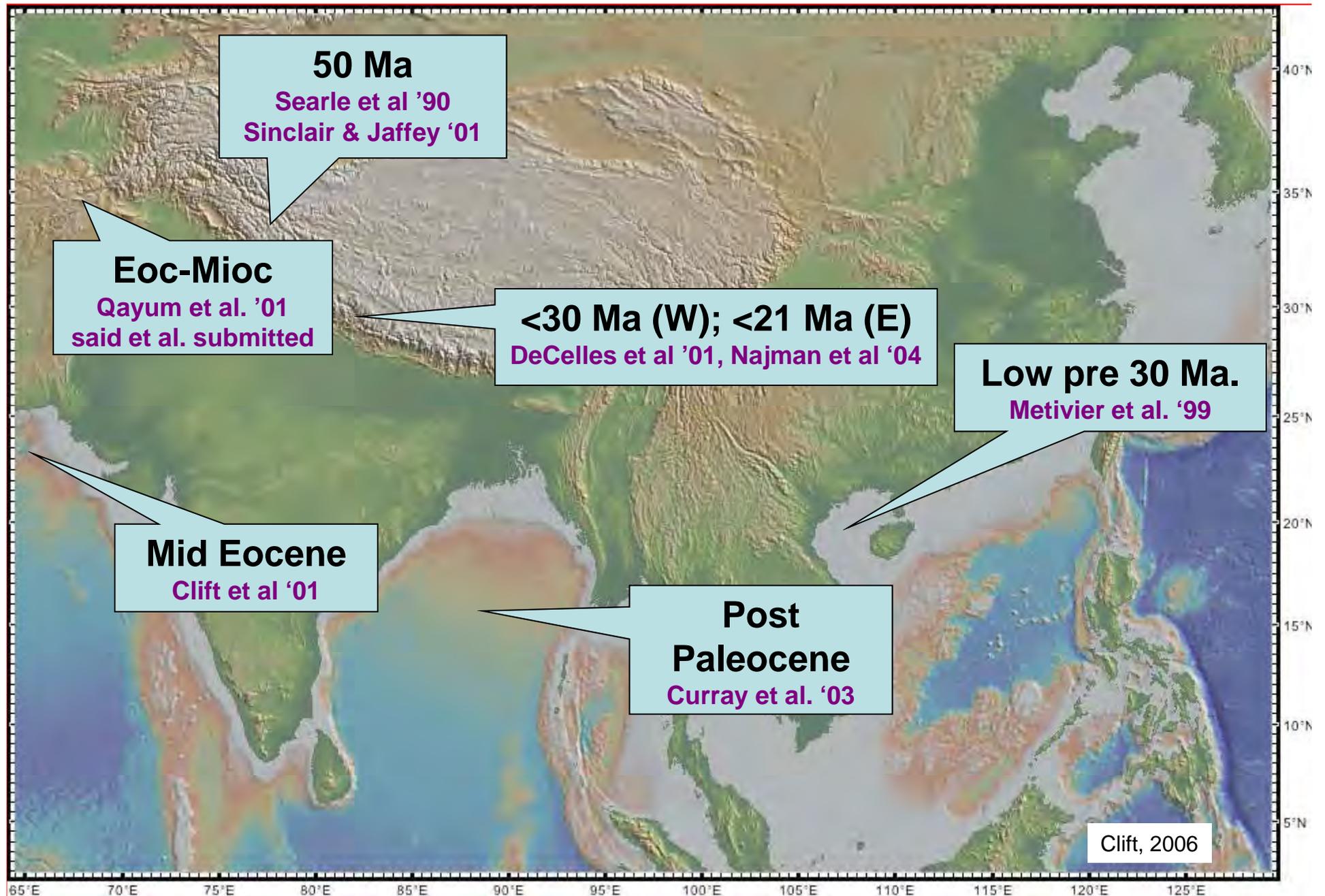


Photo: S. Guillot

**India-Asia collision ca 55 Ma. Crustal thickening of Indian plate.
Where is the Paleogene record of erosion from the rising Himalaya?**



Rôle de l'érosion dans l'exhumation des roches en collision

Himalaya : depuis 40 Ma: exhumation entre 10 et 20 km d'épaisseur de roches sur une surface de 1 million km²

Volume de roches exhumées :

entre 10 et 20 millions de km³

Est-ce que cette exhumation est compensée par l'érosion ?



2500 km

Quantité de sédiments accumulés dans les deltas de l'Indus et du Bengal:

Surface 4 millions de km²: pour une épaisseur moyenne entre 2.5 et 5 km

Soit 10 à 20 millions de km³ de sédiments

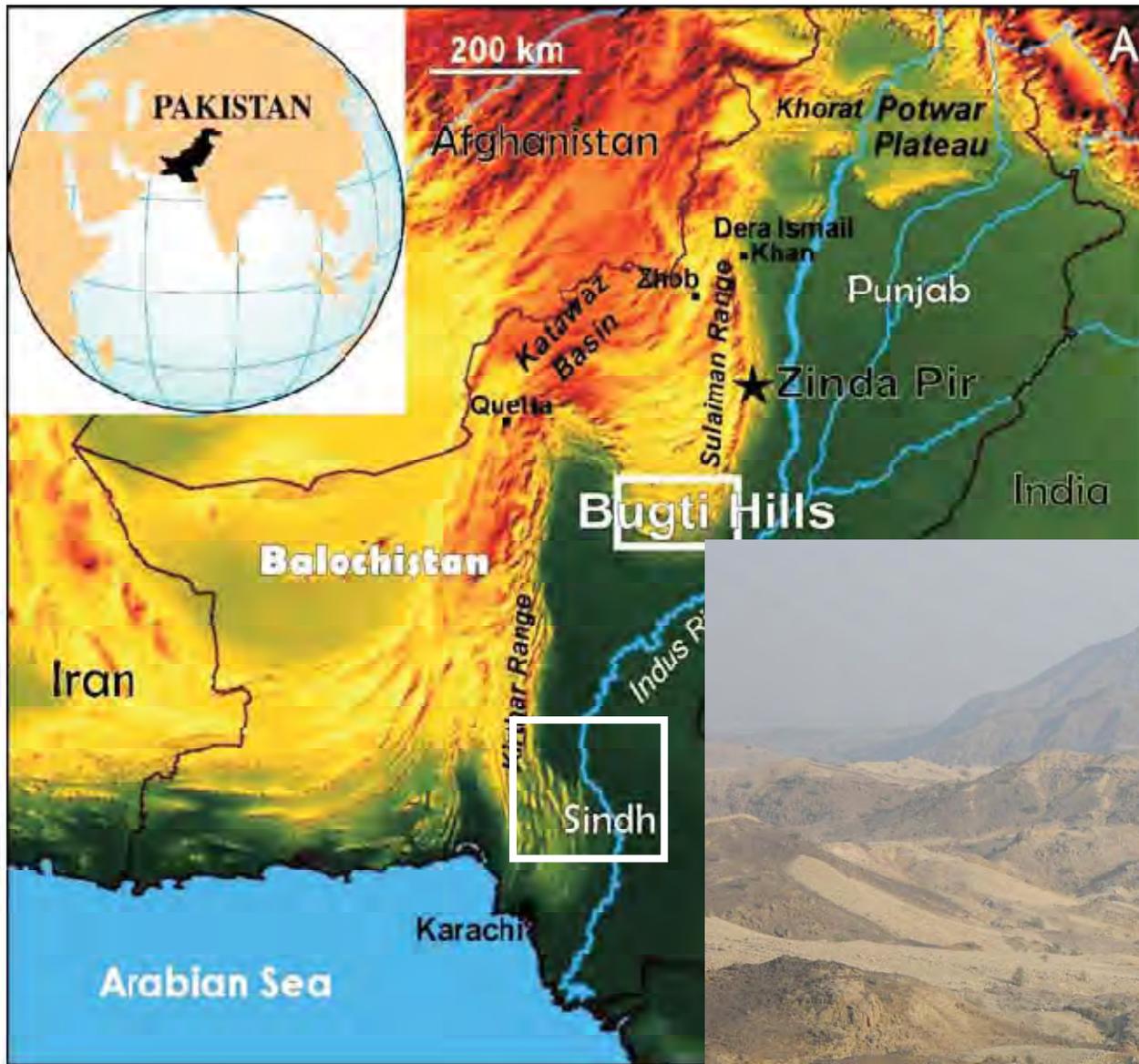
Quantité de roches exhumées = Quantité de roches érodées

Vitesse d'érosion moyenne : 0.5 mm/an

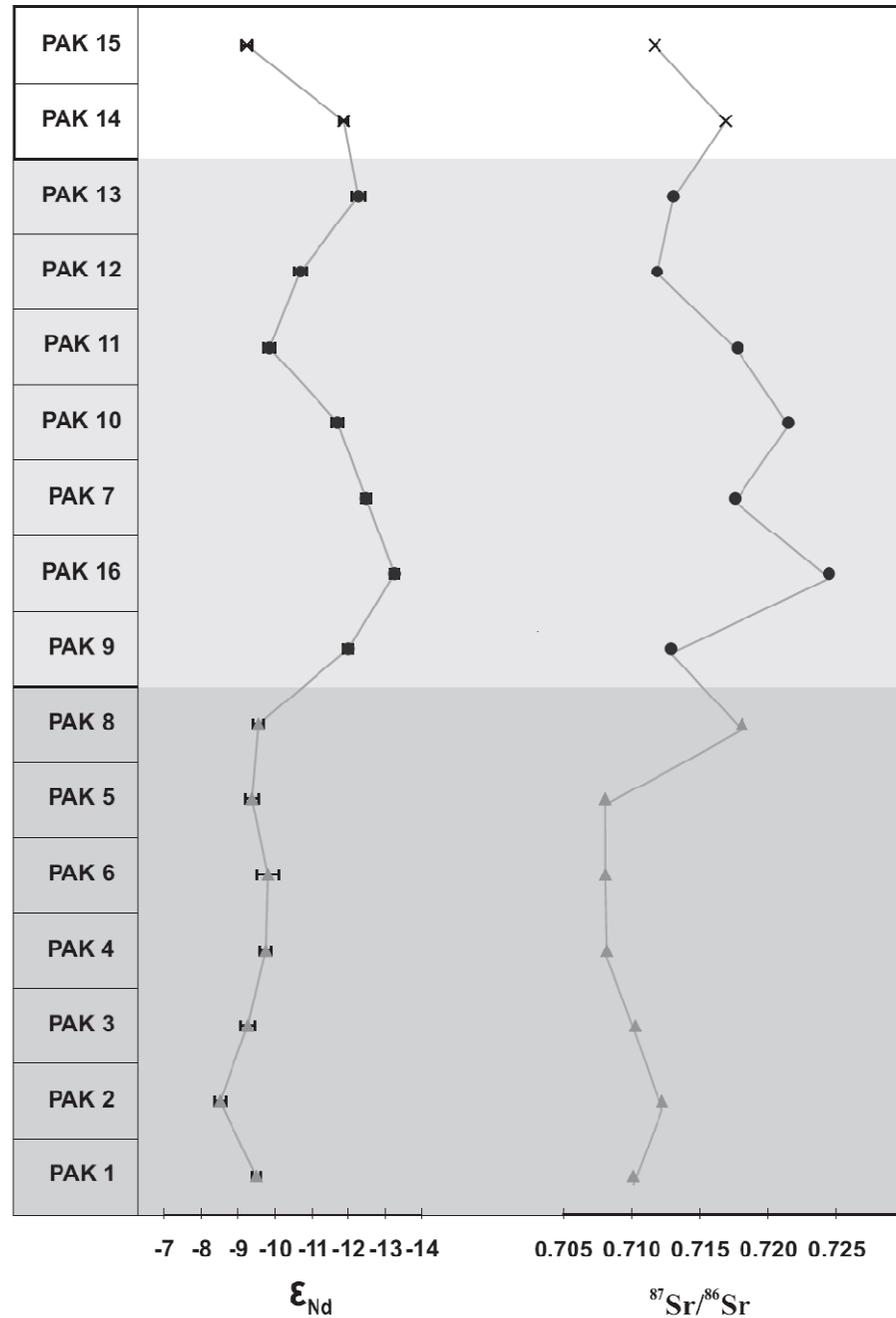
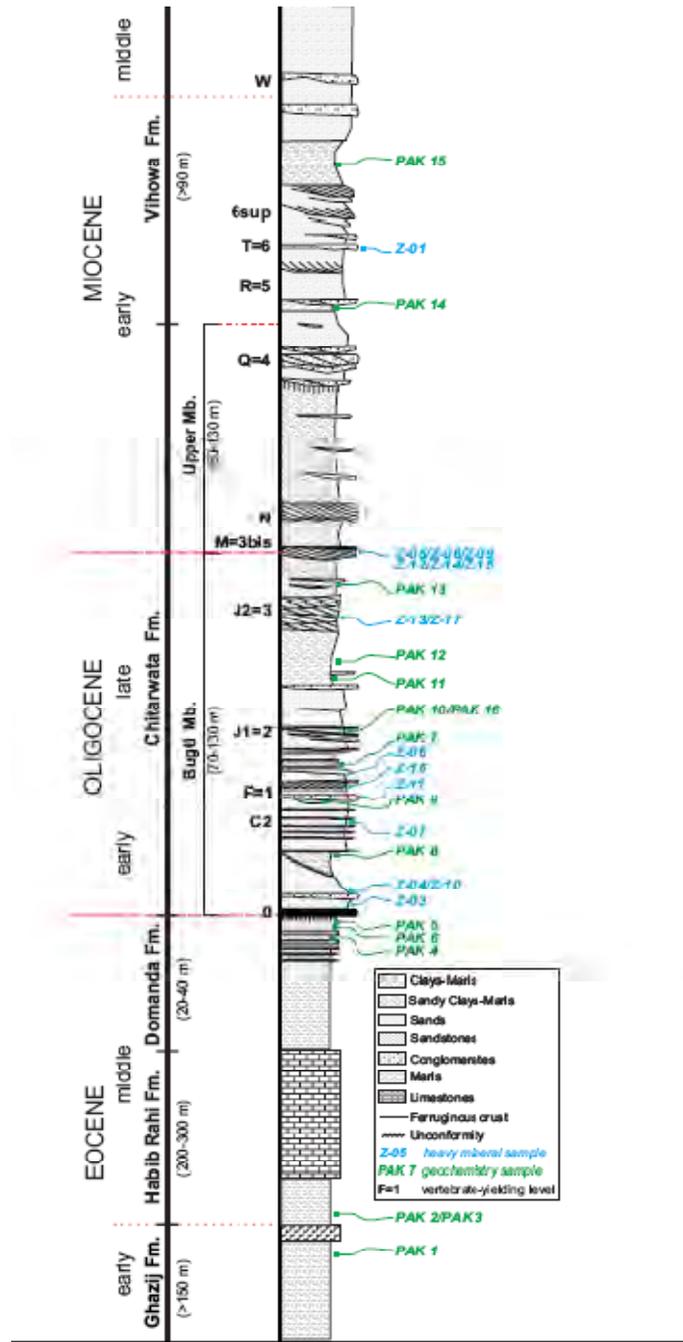
Collision

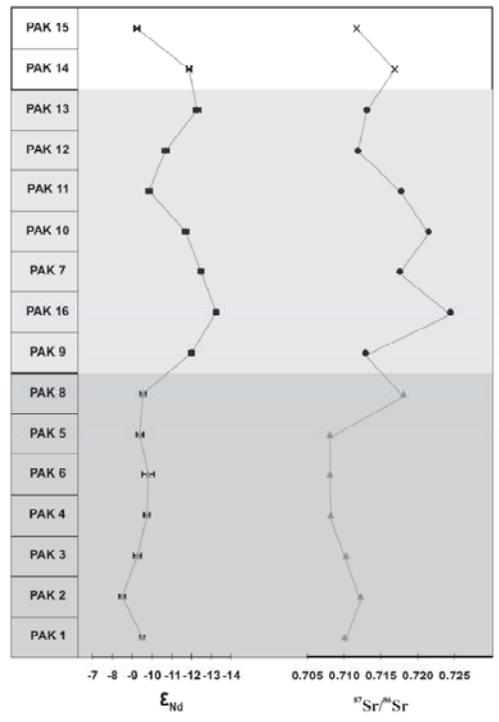
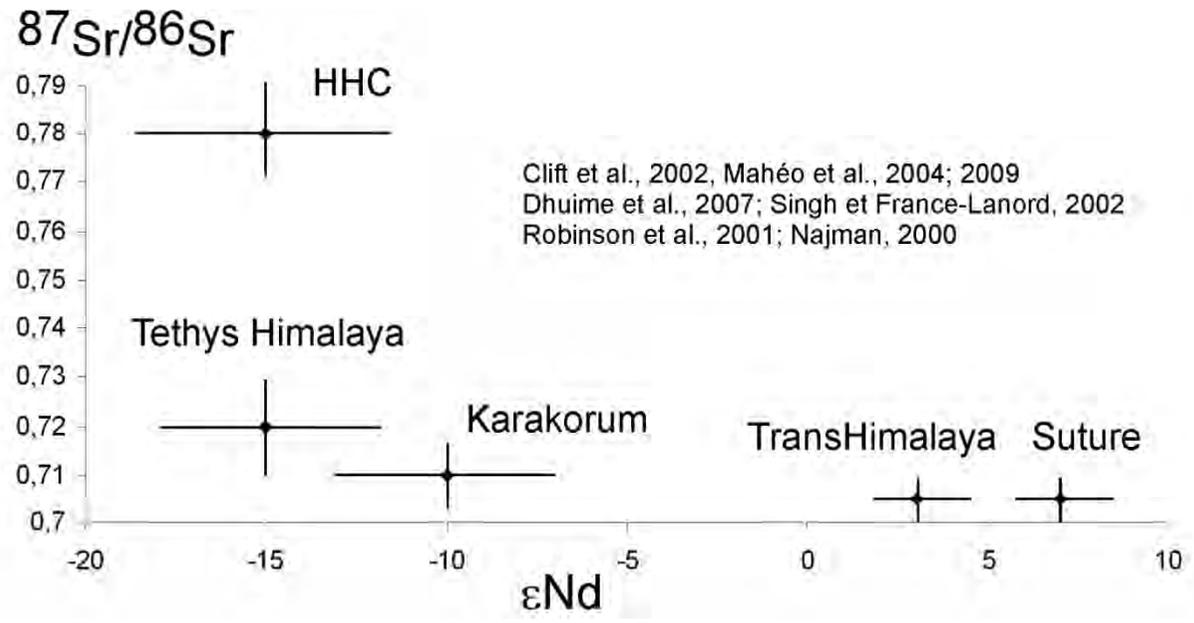
EXHUMATION = EROSION

Reliefs : Epaissement + Exhumation + Erosion



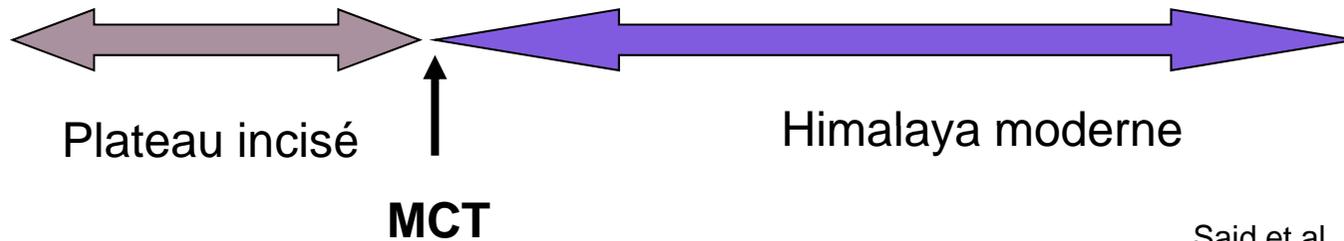
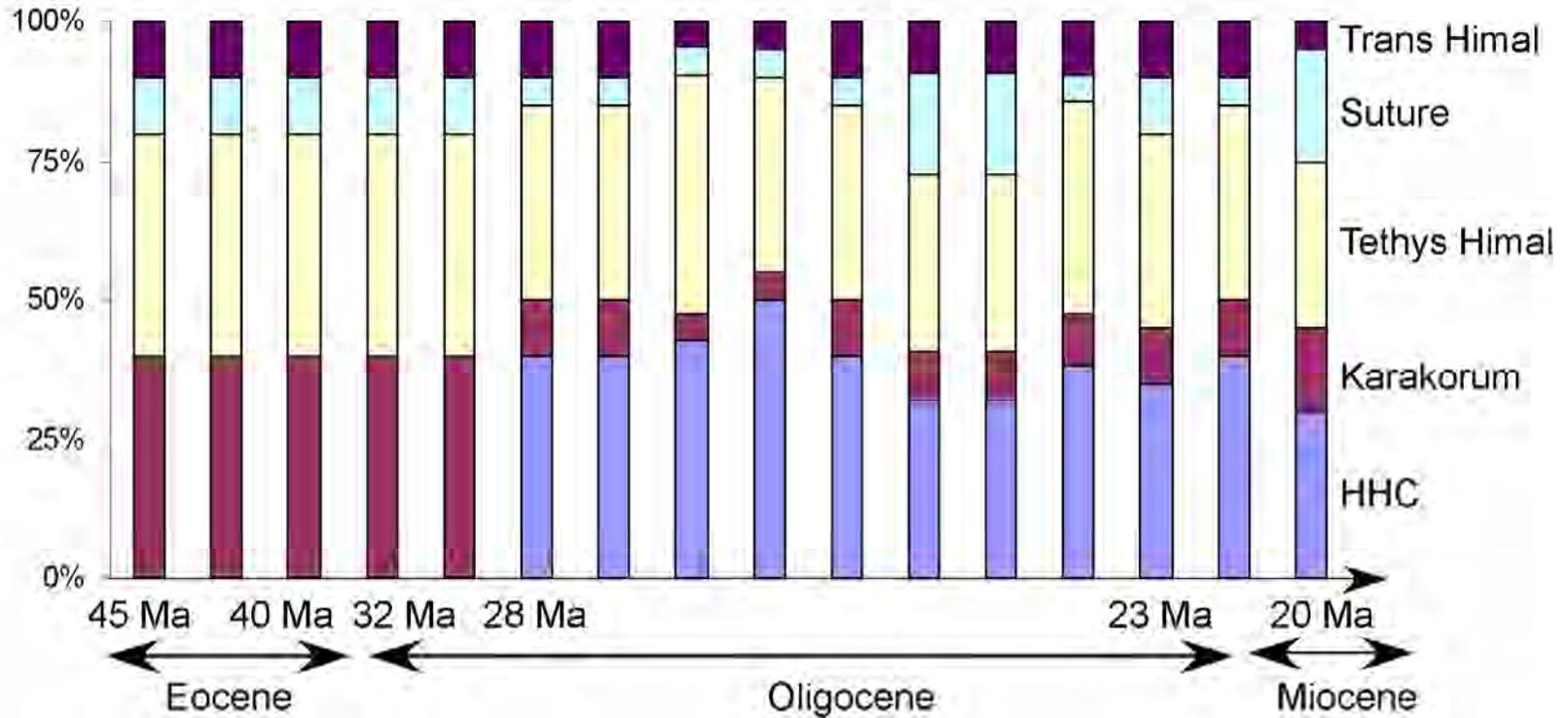
Said et al. GSA soumis





Said et al., GSA soumis

Variation des provenances au cours du temps (Paleo Indus, Pakistan)



Conclusions

Plateau Tibétain : ancien (40 Ma) formé par sous placage
de la croûte inférieure + lithosphère indienne rigide

Plateau Tibétain pas ou peu influencé par les forçages externes (précipitation/érosion)

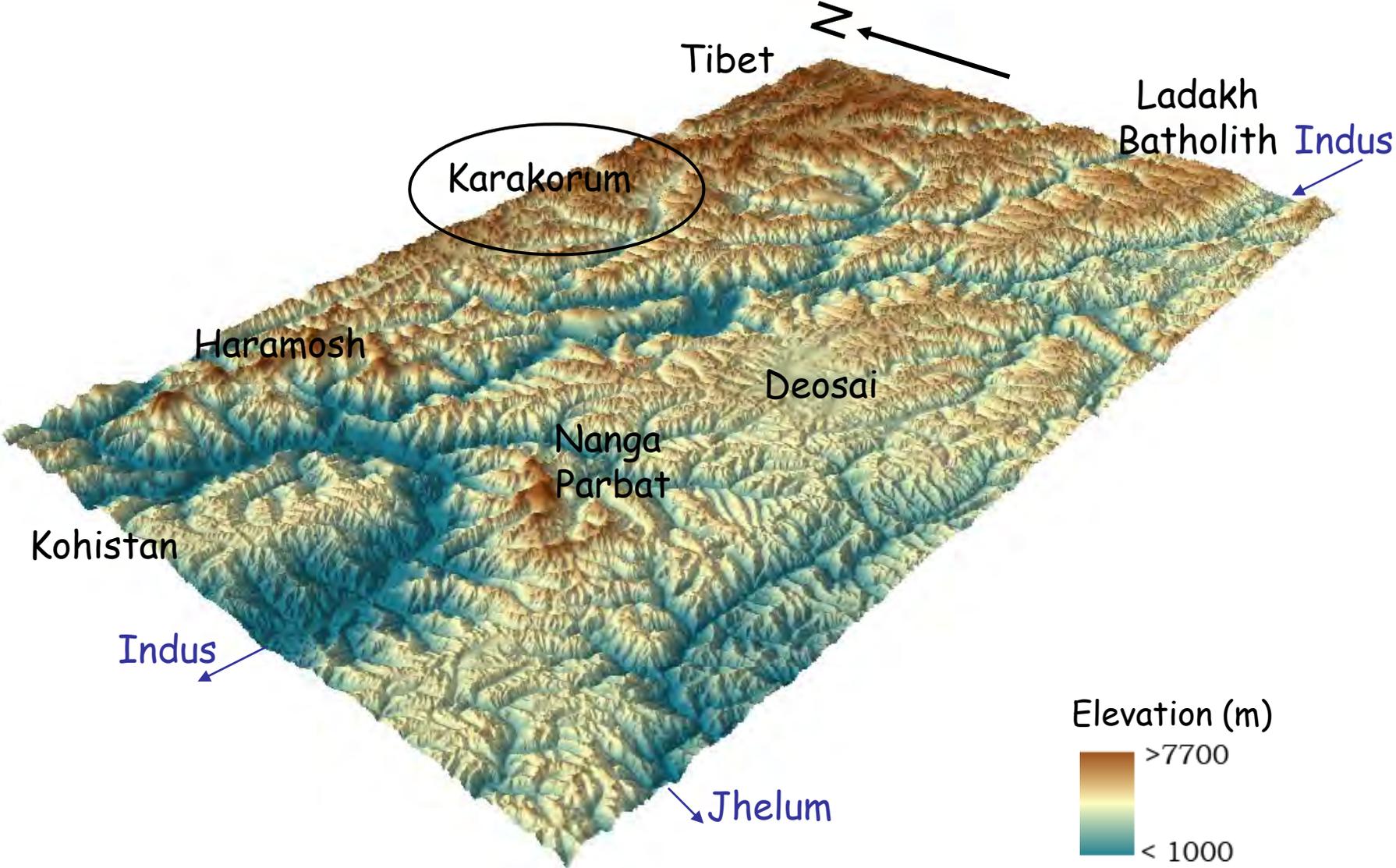
Himalaya du NW : plateau ancien, incisé par le réseau de drainage de l'Indus

La Haute Chaîne Himalayenne : plateau ancien ?
fort
couplage tectonique/ précipitation/érosion, depuis environ 30 Ma



Merci pour votre attention

NW Himalaya





Rakaposhi (7788m)

Vallée d'Hunza (~2100m)

Photo: G. Mahéo



20 km

Glacier du Baltoro
(Pakistan)



Image © 2005 MDA EarthSat
Image © 2005 DigitalGlobe

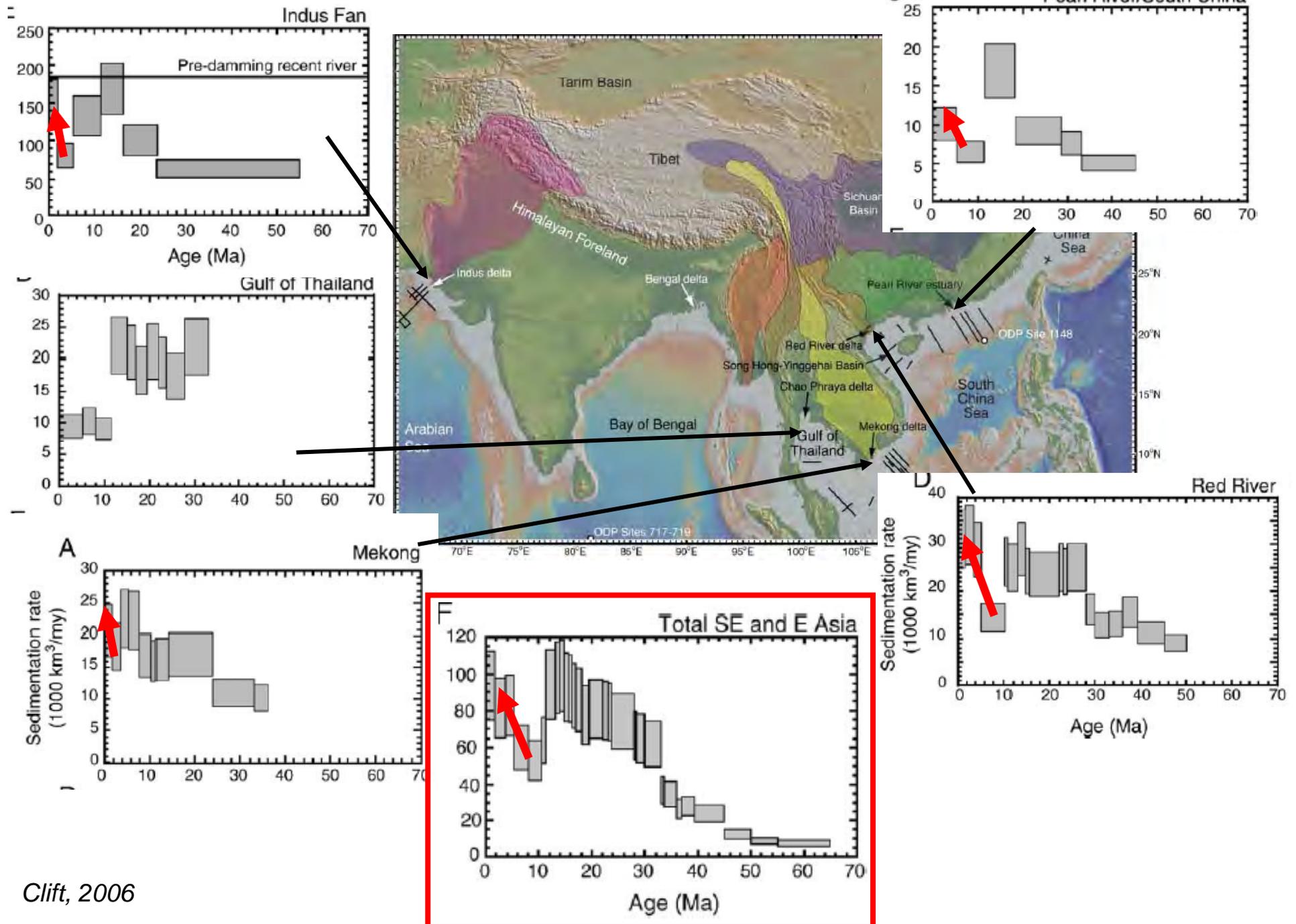
Google

Pointer 35°42'10.25" N 76°34'08.51" E elev 4724 m

Streaming [|||||] 100%

Eye alt 81.63 km

3. Mécanismes d'exhumation du sud Karakorum. Liens avec l'érosion de la chaîne



Augmentation des taux d'érosion depuis 5 Ma – un signal global ?

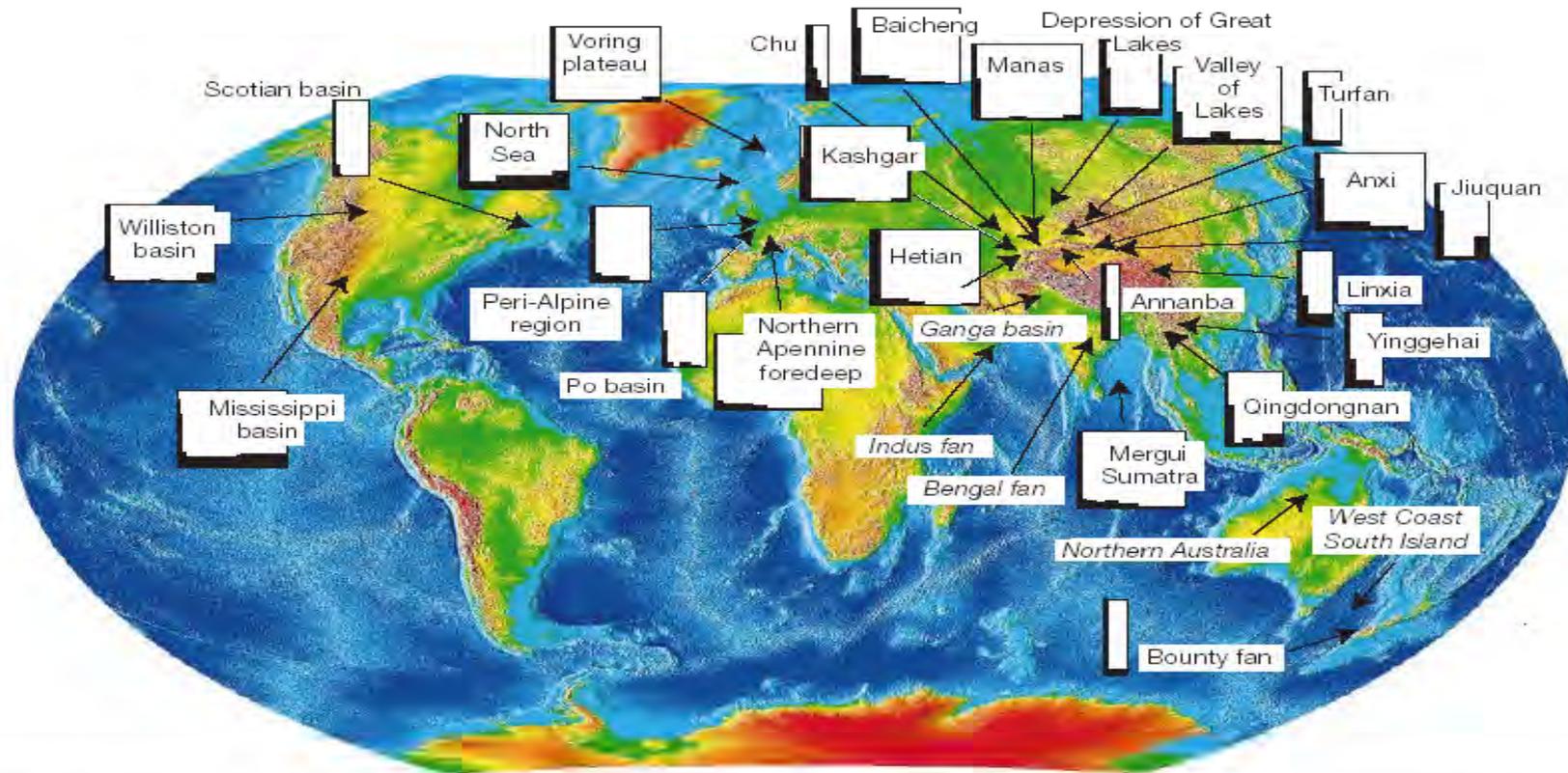
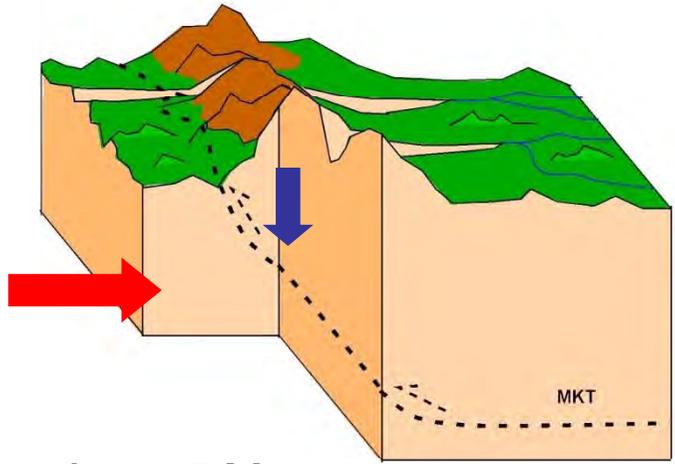


Figure 2 Map of the Earth showing selected areas where sedimentation rates have increased substantially since 2–4 Myr ago. (Details are given in Fig. 4 and Supplementary Information.) For each area, a small histogram is shown. The vertical scale is normalized to

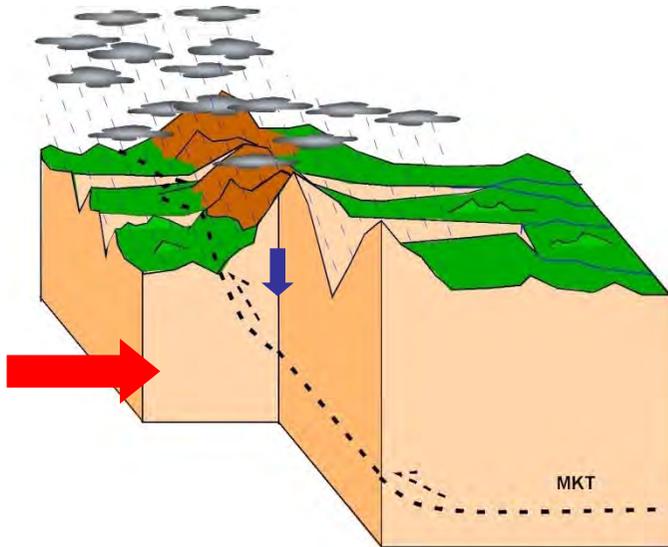
the maximum sedimentation rate in that area, and all horizontal axes are plotted at the same timescale; the longest records extend to 65 Myr ago. We show only the part of the Cenozoic for which there are measurements.

3. Mécanismes d'exhumation du sud Karakorum

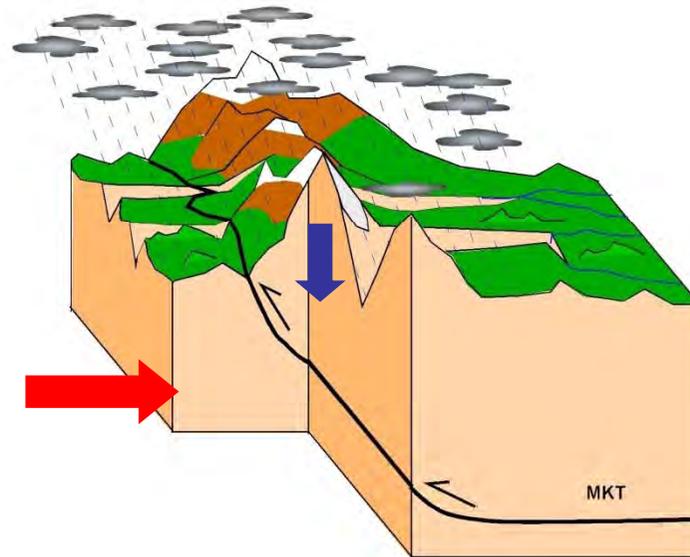


Ante 5 Ma

→ Convergence Inde-Asie
↓ Poids des roches au dessus du MKT

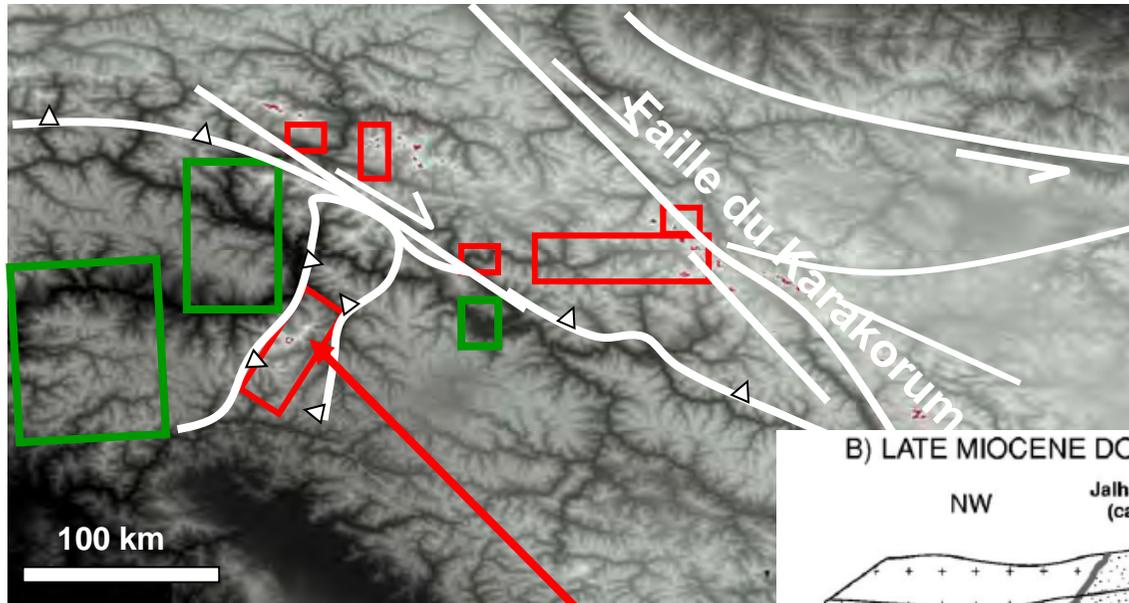


5 Ma



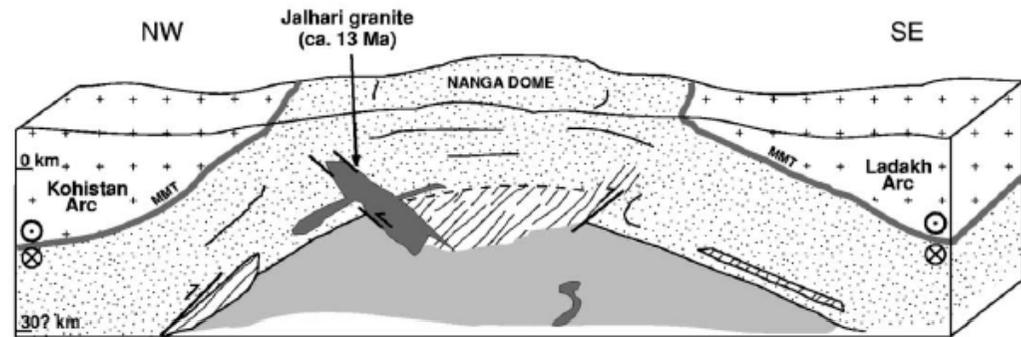
Mahéo et al. en préparation

3. Mécanismes d'exhumation du sud Karakorum

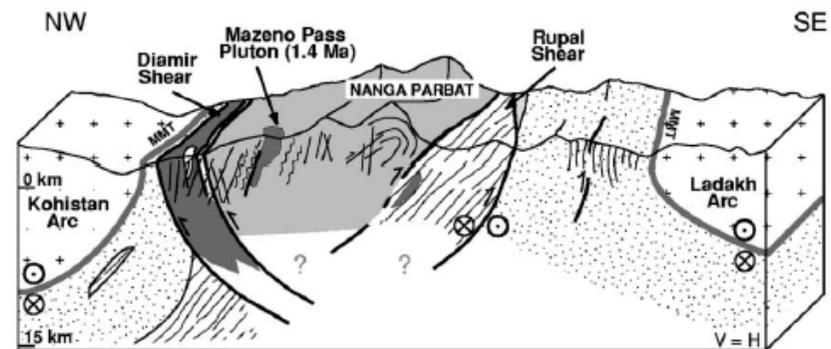


Syntaxe du Nanga Parbat

B) LATE MIOCENE DOMING



C) PRESENT POP-UP STRUCTURE



Schneider et al., 01