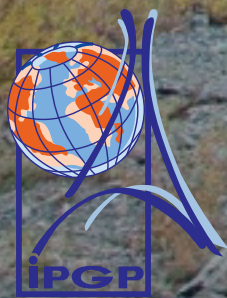


Failles et séismes

Quand la terre se déforme

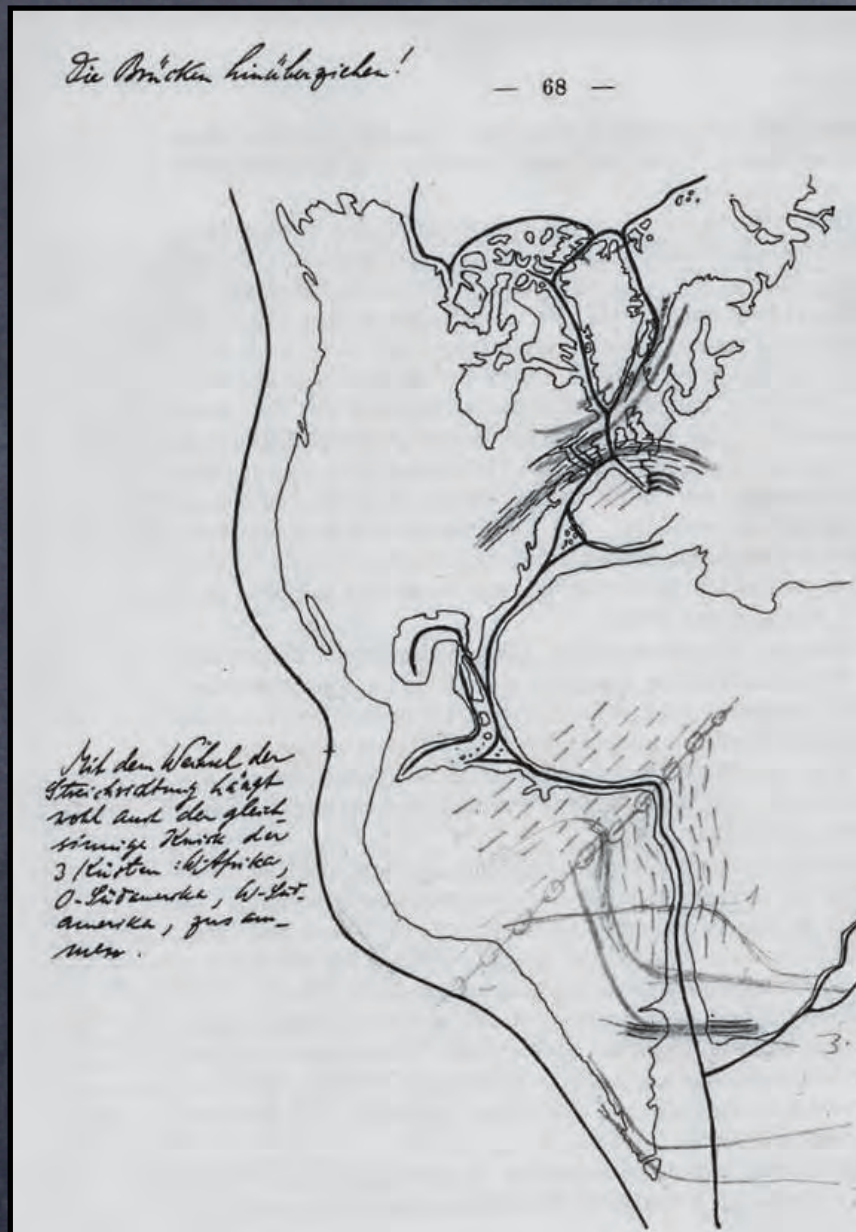
Y. Klinger

Tectonique – Institut de Physique du Globe de Paris
CNRS



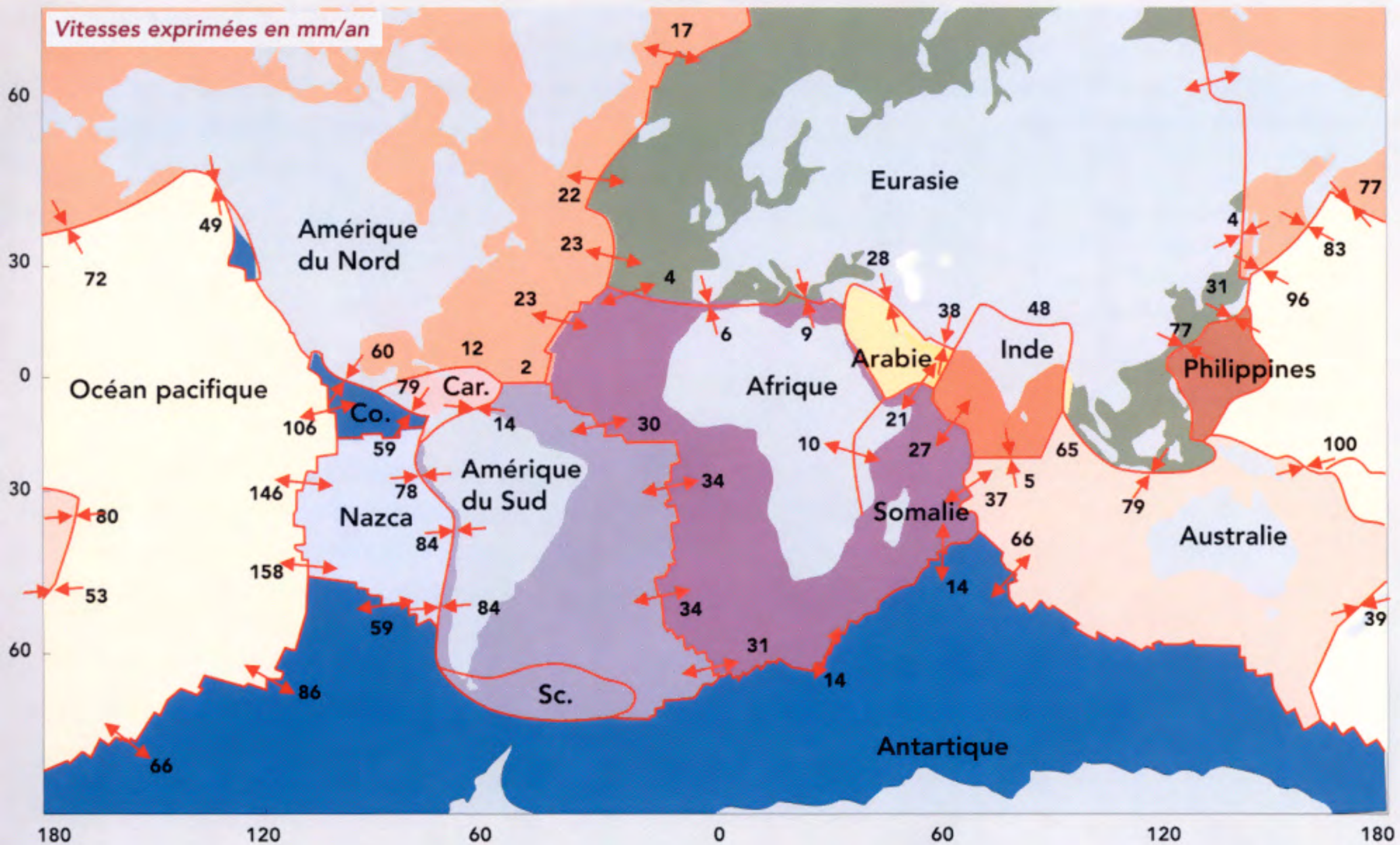
Contact : klinger@ipgp.fr

La tectonique des plaques, une théorie qui a tout juste 100ans

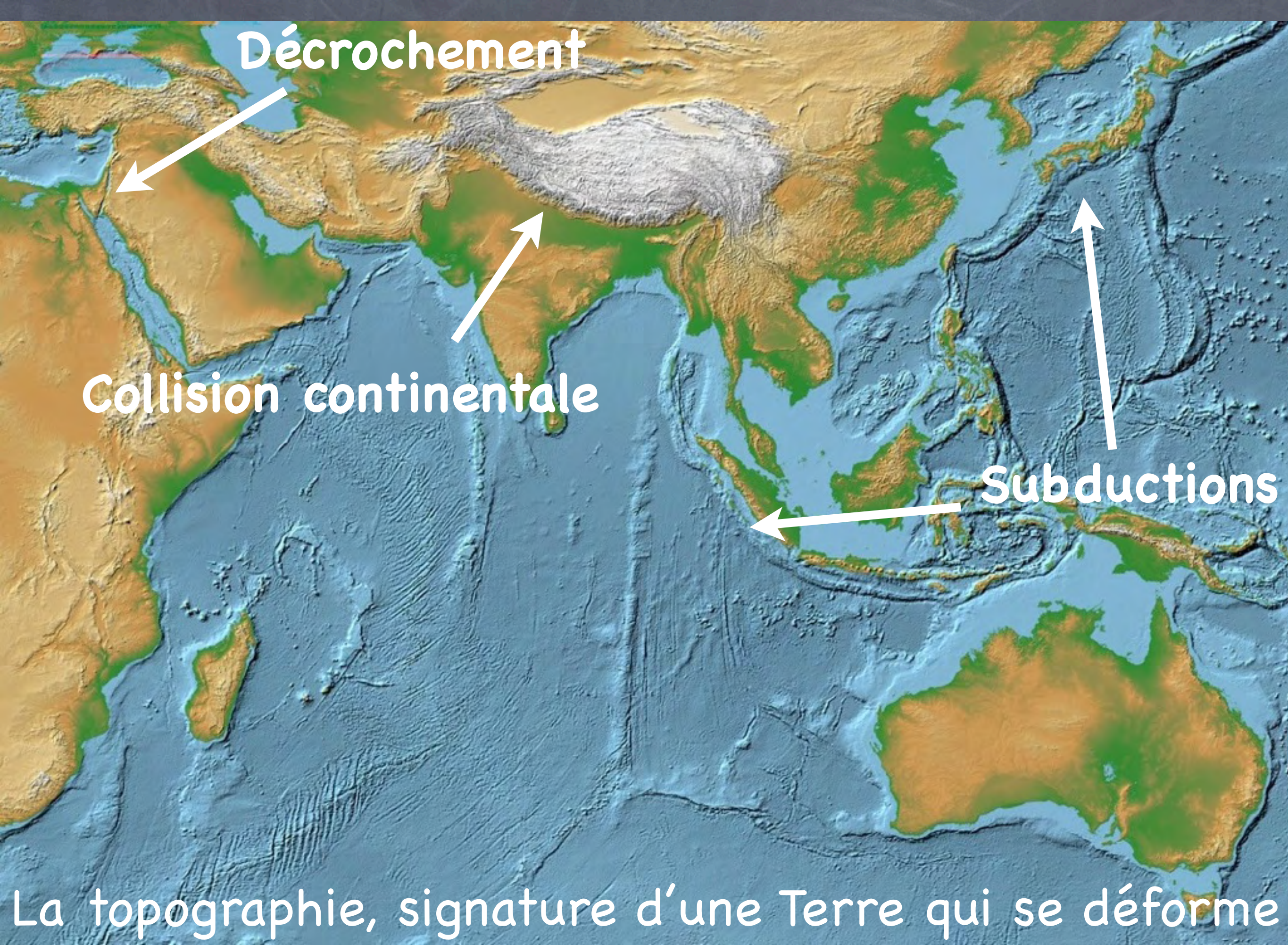


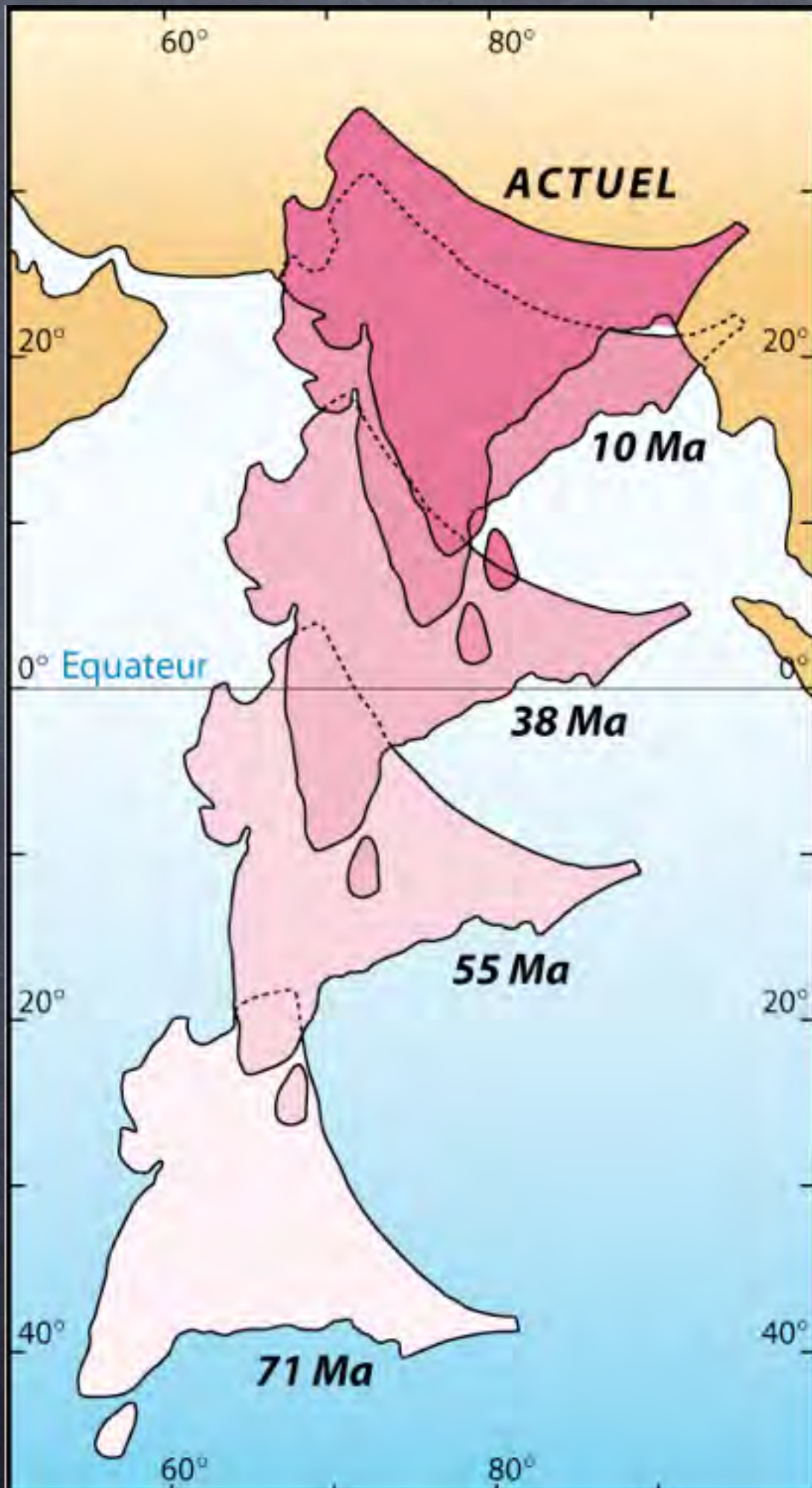
En 1915, Alfred Wegener propose sa théorie de la dérive des continents
> des observations exactes, mais une explication fausse

Il faudra attendre la fin des années 60 pour que la révolution de la tectonique des plaques soit formalisée
> reconnaissance de la symétrie des anomalies magnétiques dans l'océan Atlantique en 66 puis formulation de la théorie en 68.



tectonique des plaques





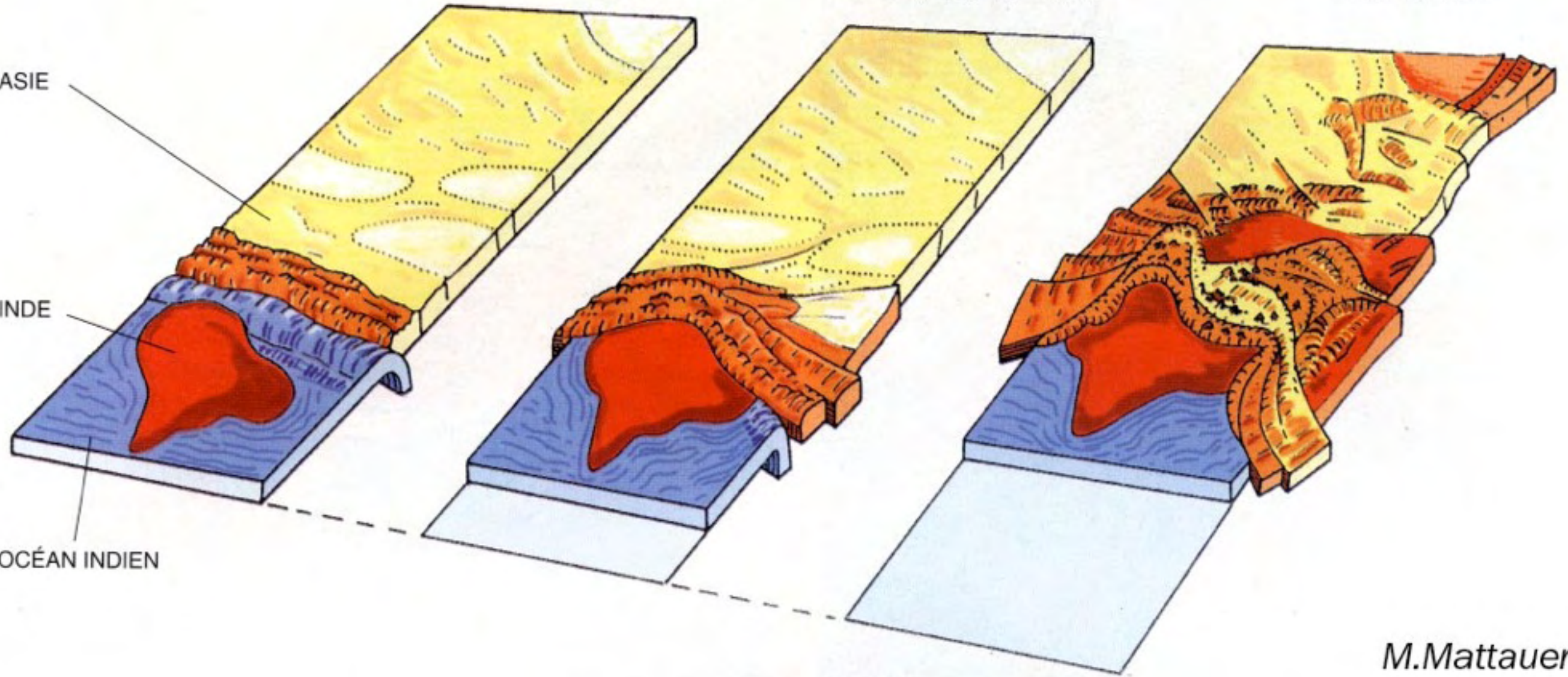
La collision Inde-Asie responsable d'une grande partie de la déformation du continent asiatique

IL Y A 60 MILLIONS D'ANNÉES

ÉTAT INTERMÉDIAIRE

ÉTAT ACTUEL

ASIE
INDE
OCÉAN INDIEN

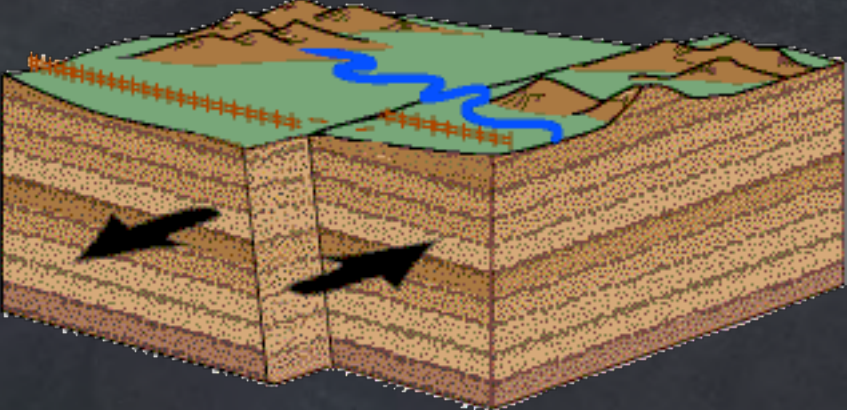


M. Mattauer

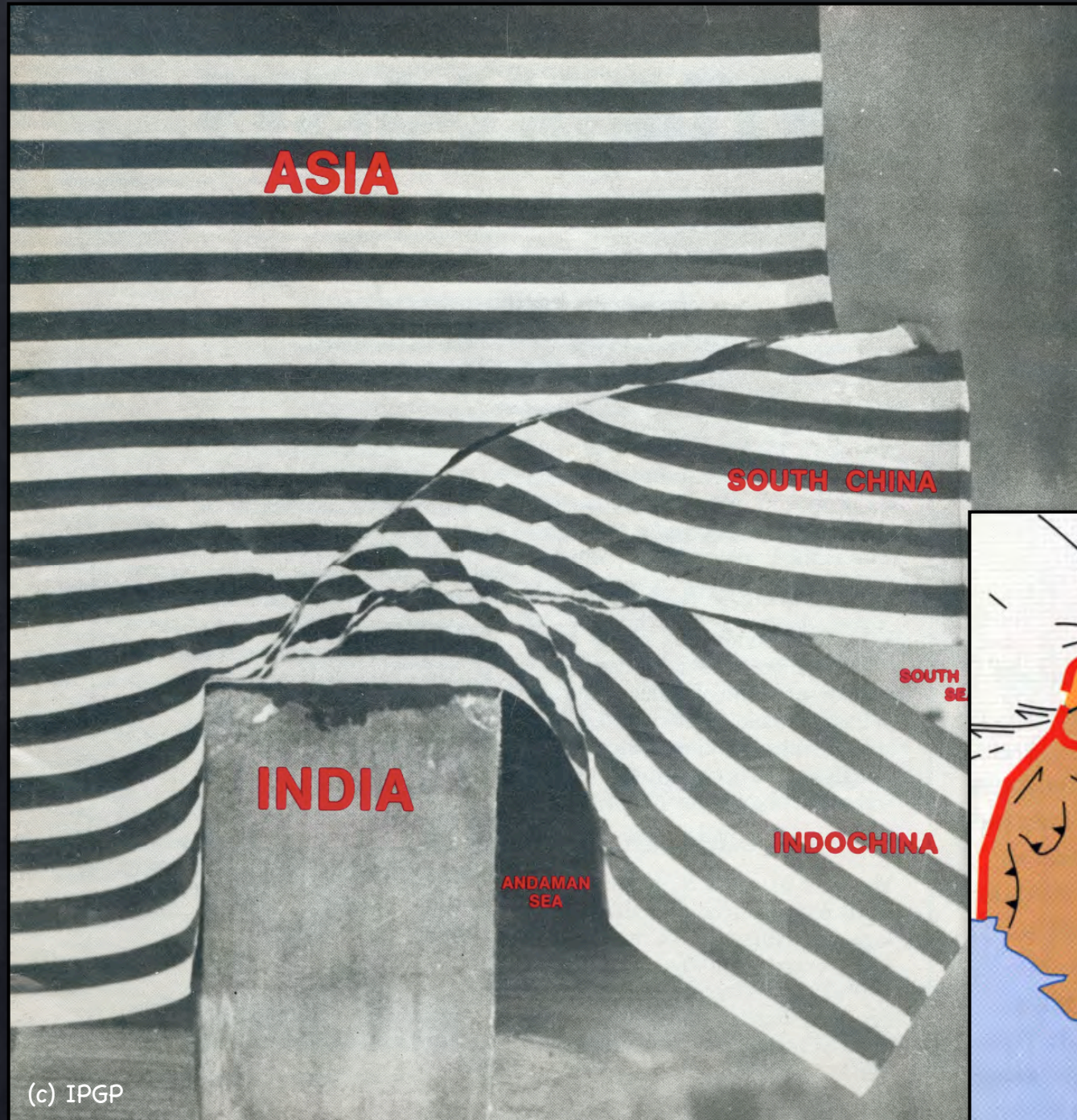
Une experience au laboratoire



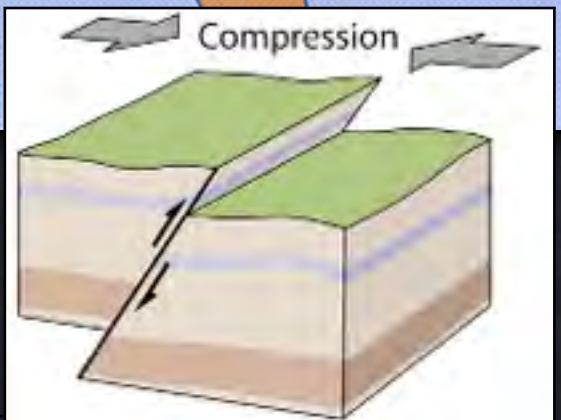
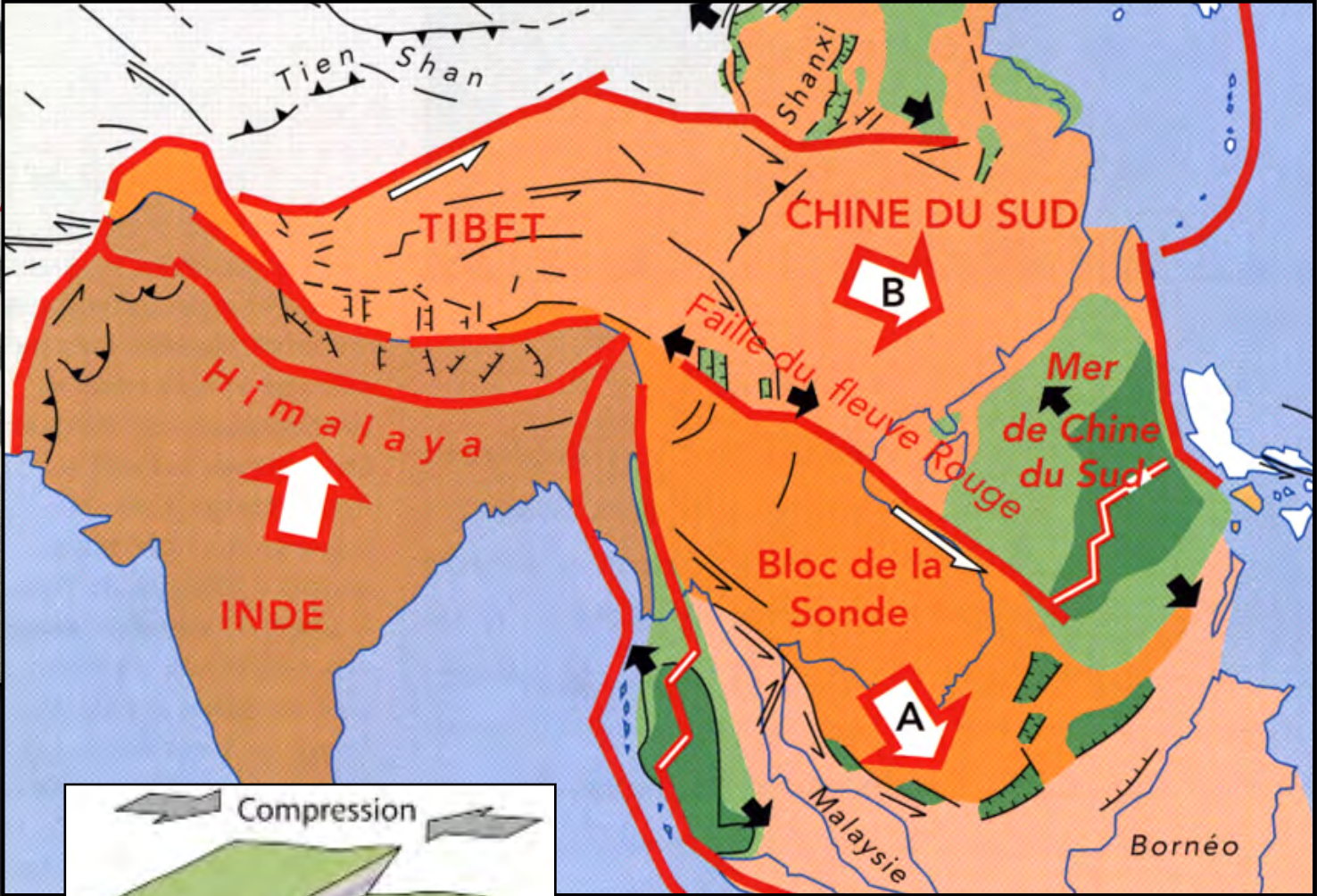
Décrochement



(c) USGS



(c) IPGP

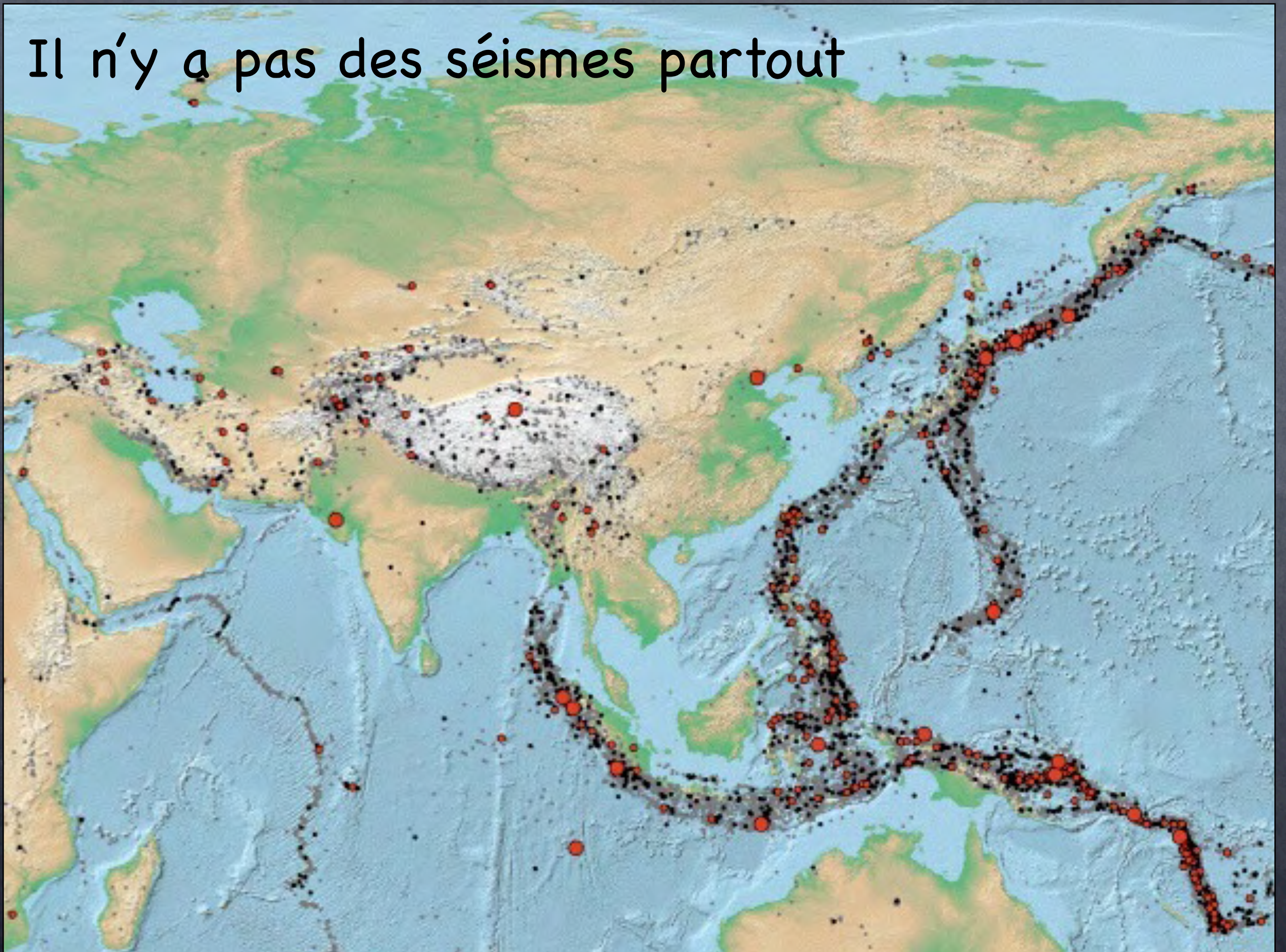


(c) IPGP

Chevauchement au front

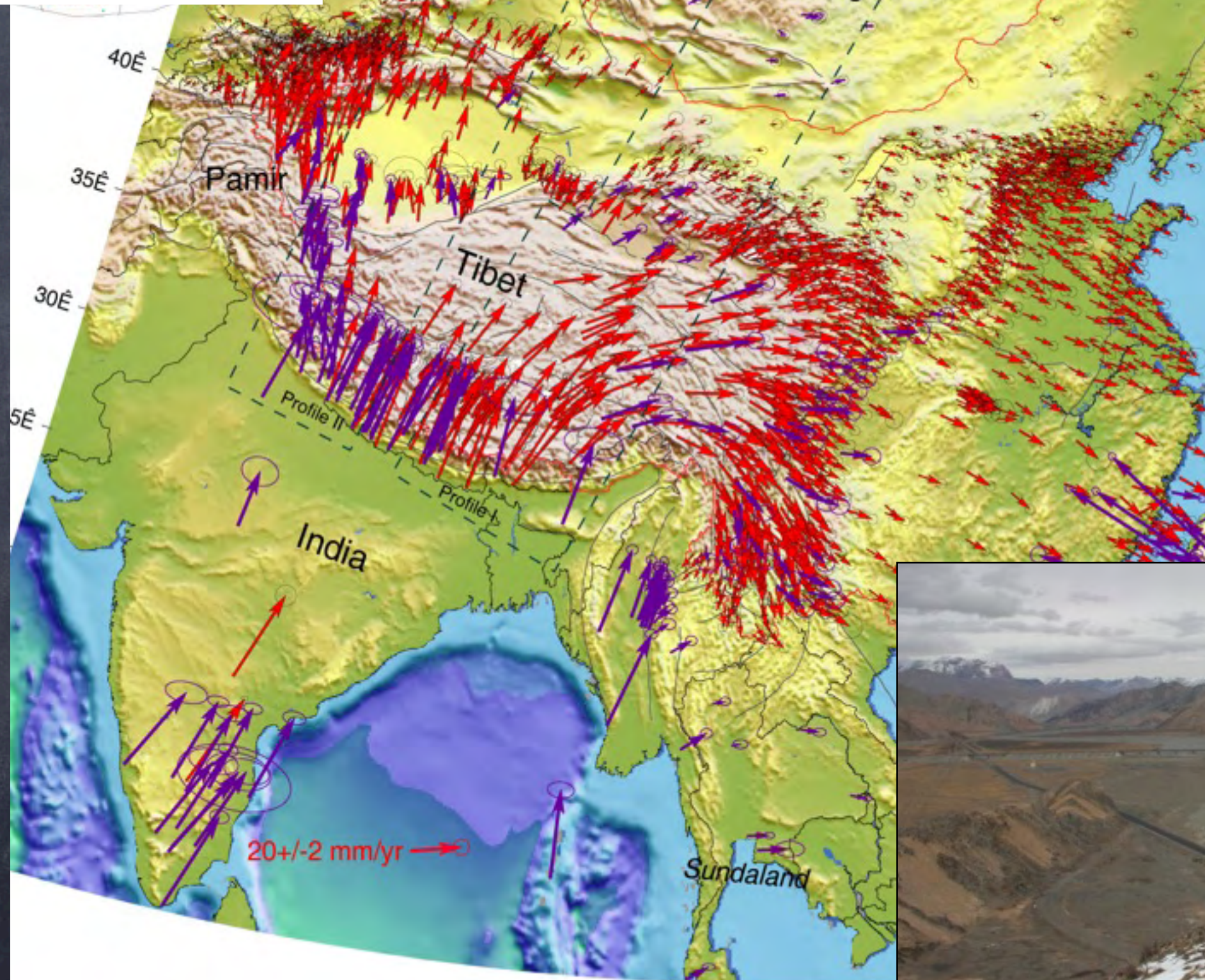


Il n'y a pas des séismes partout



New velocity map of Asia :

Combining all data from
1991 to 2004

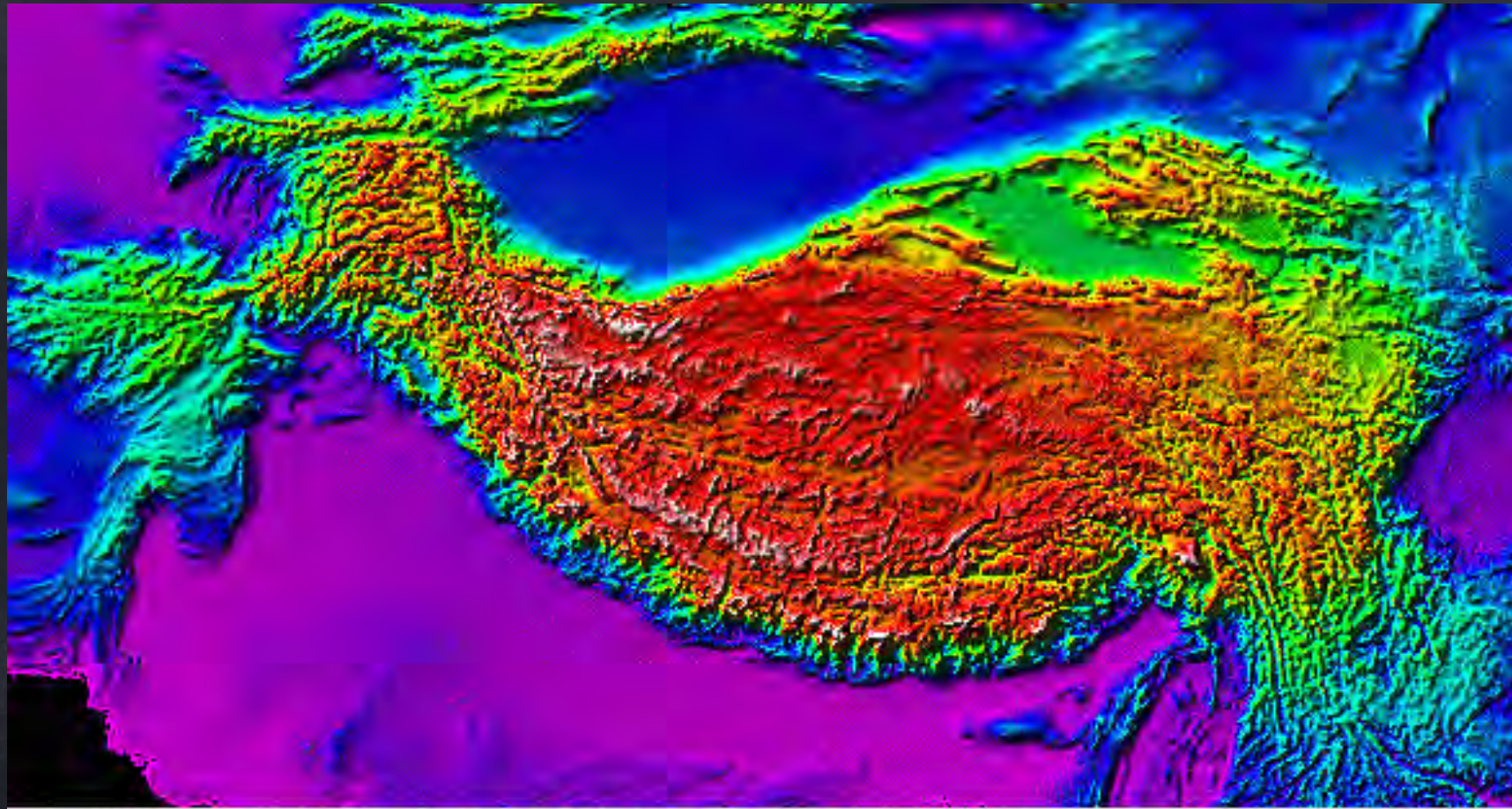


La déformation
instantanée se
mesure avec le
GPS

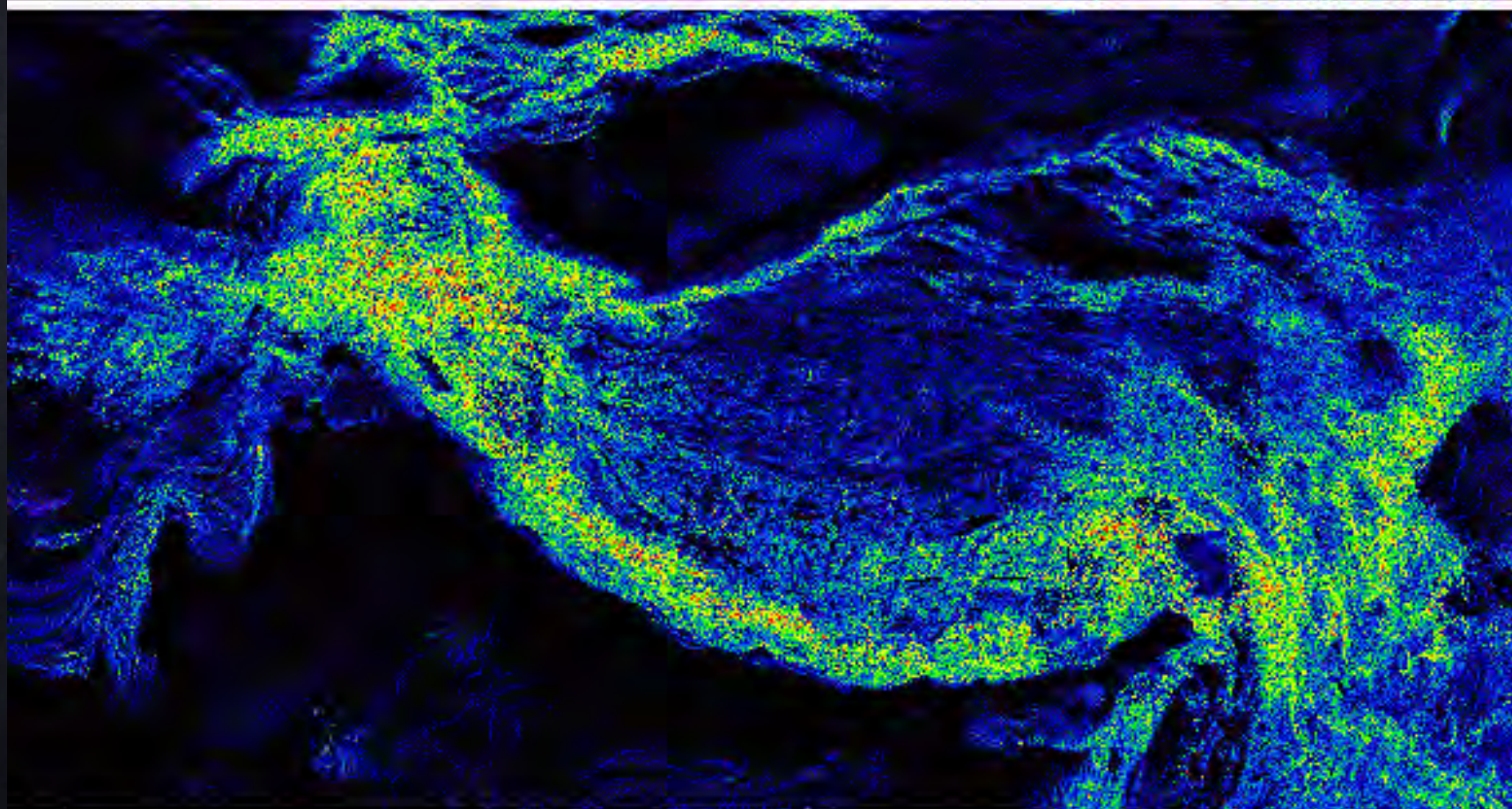


Sous l'action des forces tectoniques la croûte terrestre se déforme

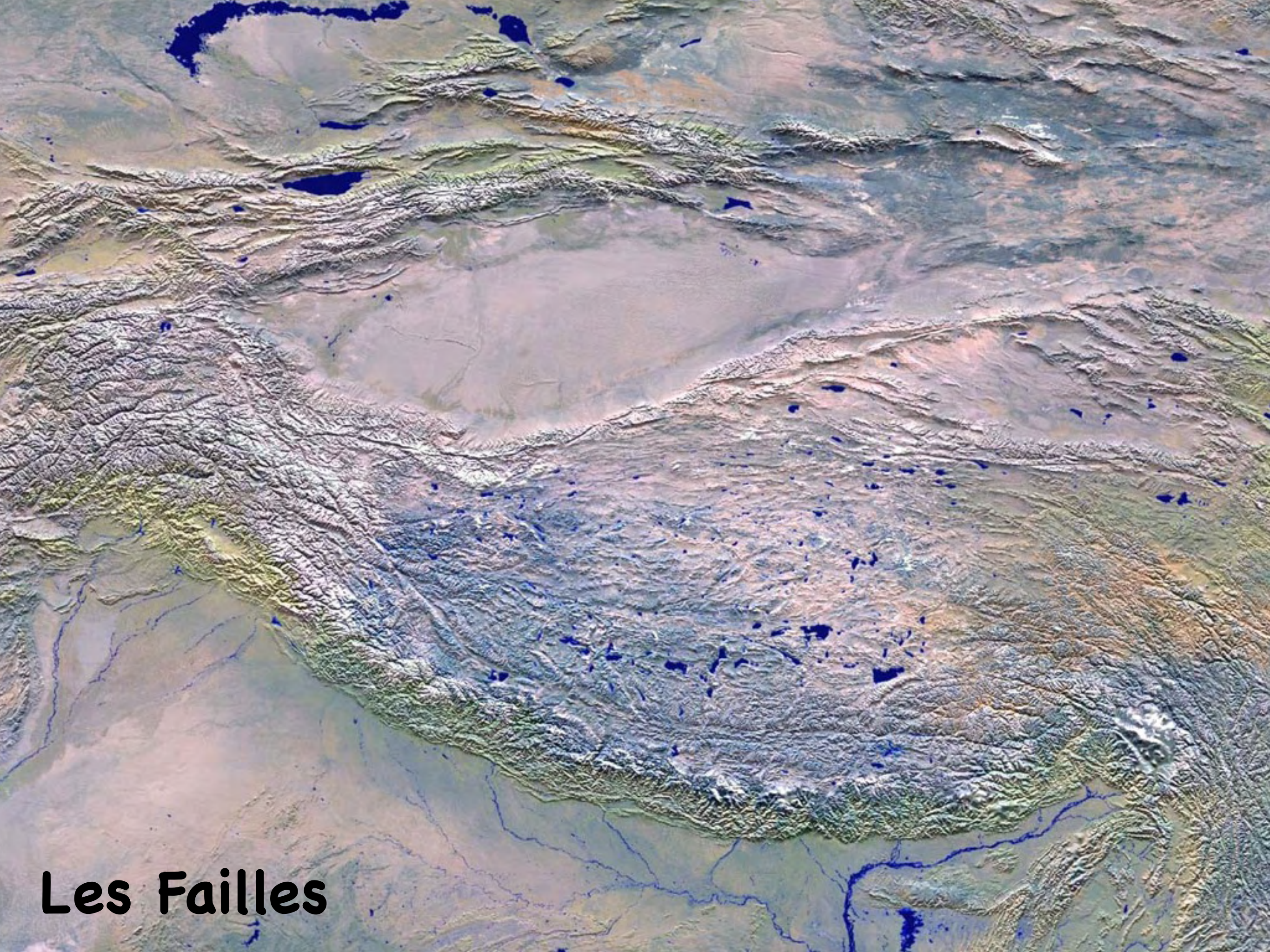
- Où se localise cette déformation ?
- Quels outils pour mesurer cette déformation ?
- Le séisme comme acteur de cette déformation



Altitude



Pente



Les Failles

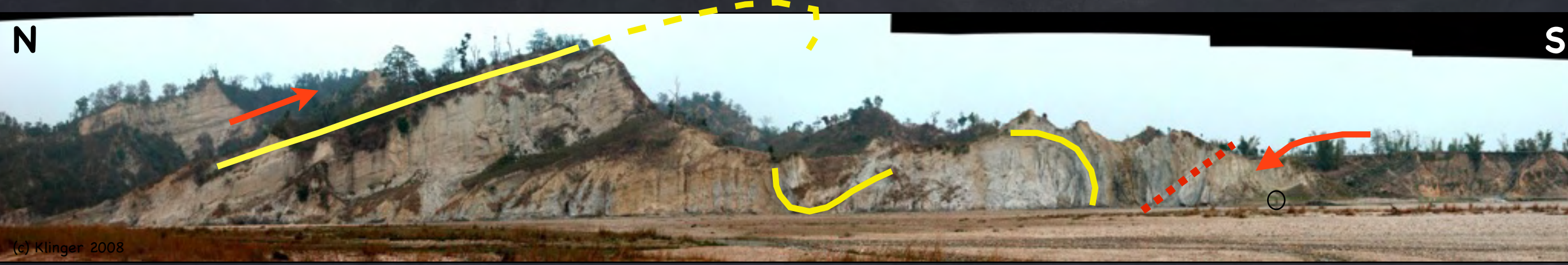
La plaine du Gange, une plaine très plate



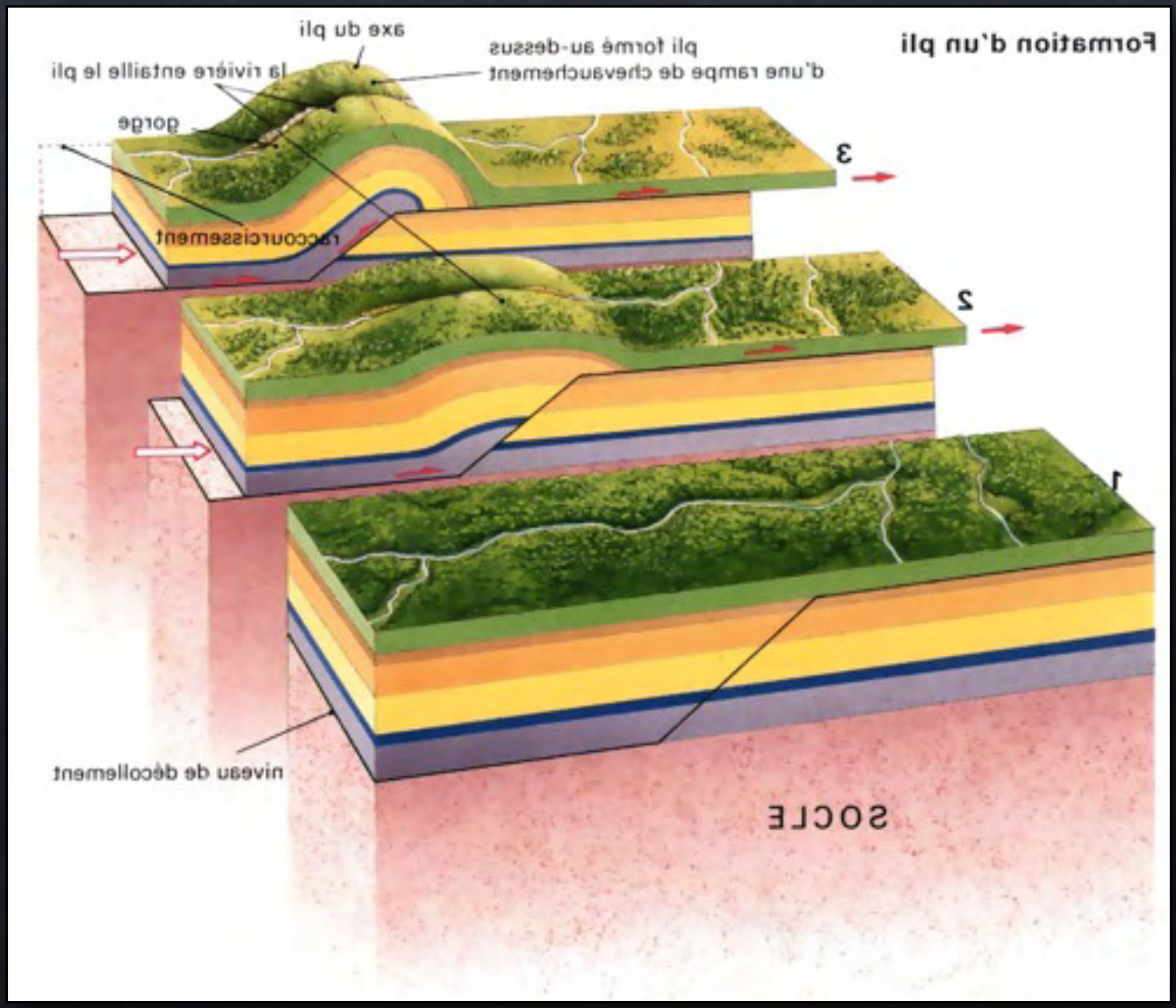
sauf si l'on tourne la tête...







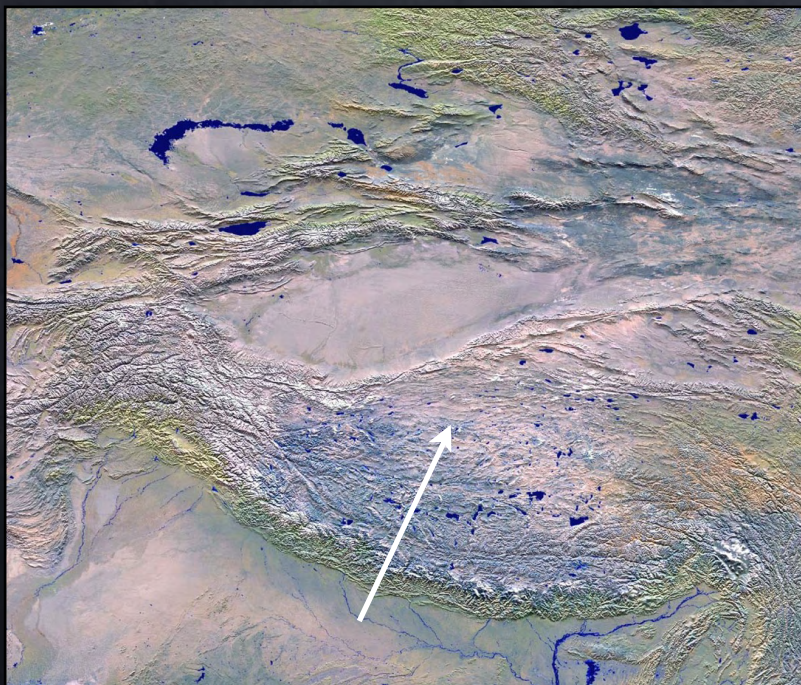
(c) Klinger 2008





(c) Klinger 2008

La chaîne des Himalayas

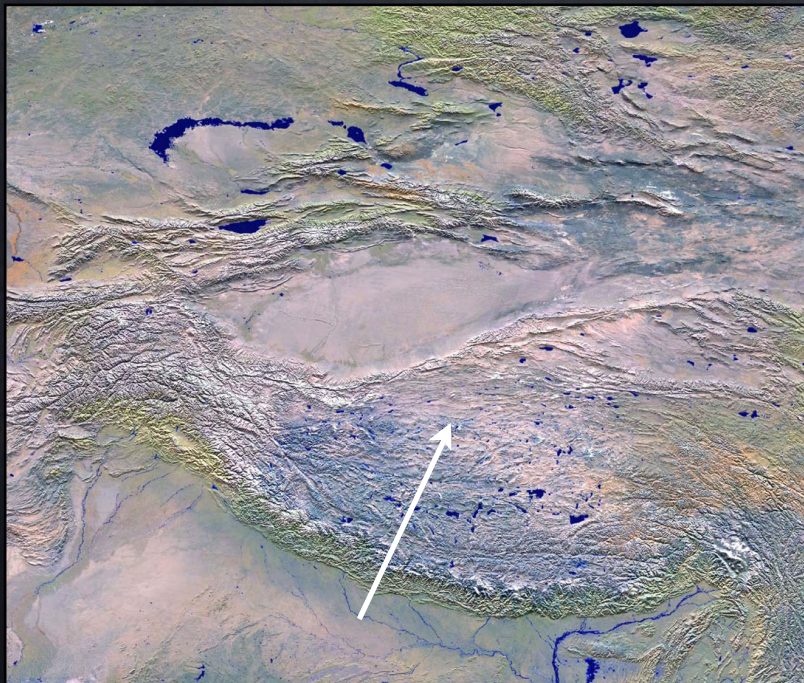


(c) Klinger 2008



(c) Klinger 2008

Le plateau tibétain
c'est à 5000m,
mais c'est plat!



(c) Klinger 2008



Le plateau a des limites bien marquées

Image Landsat, Pixel 30m

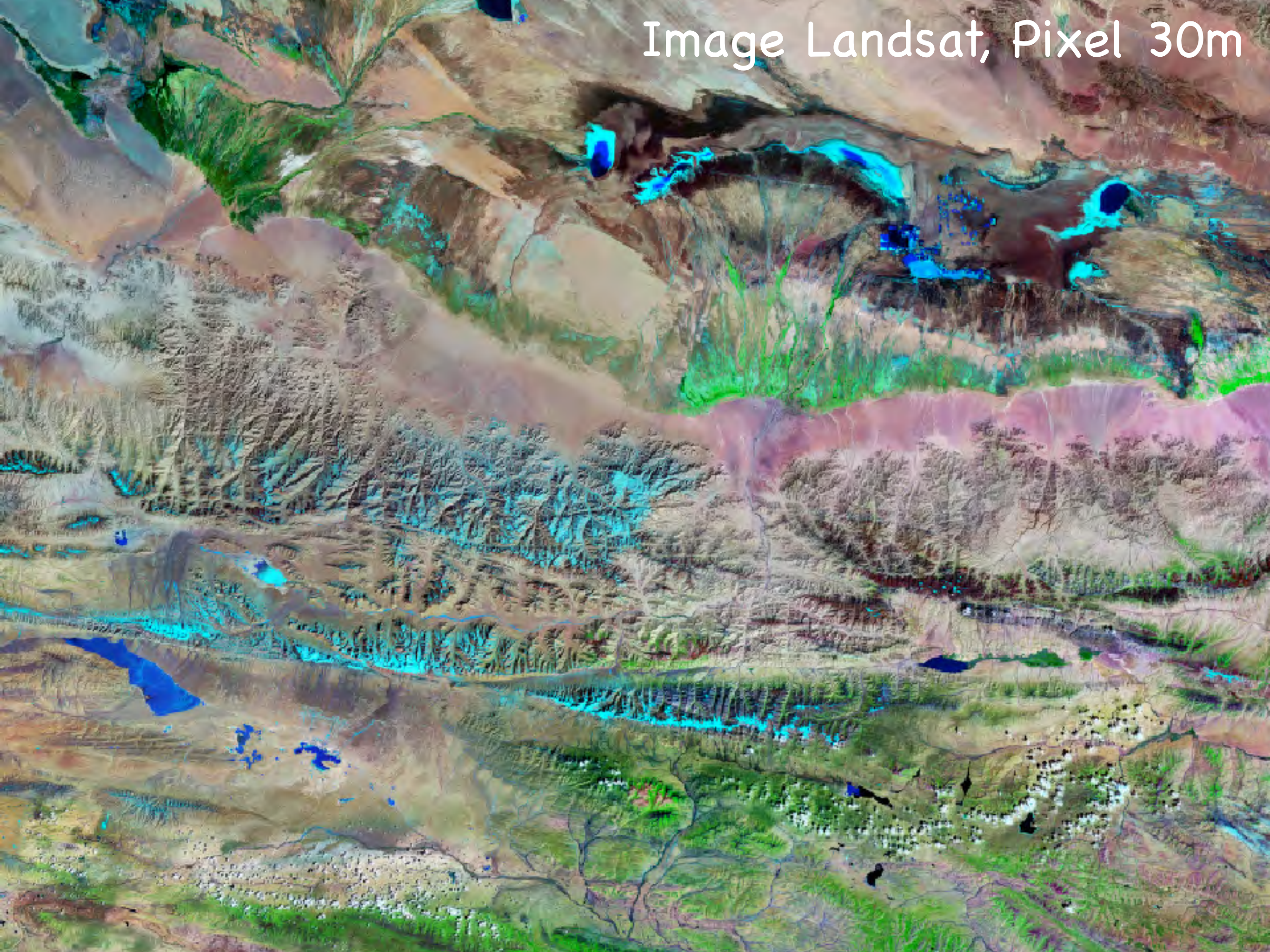
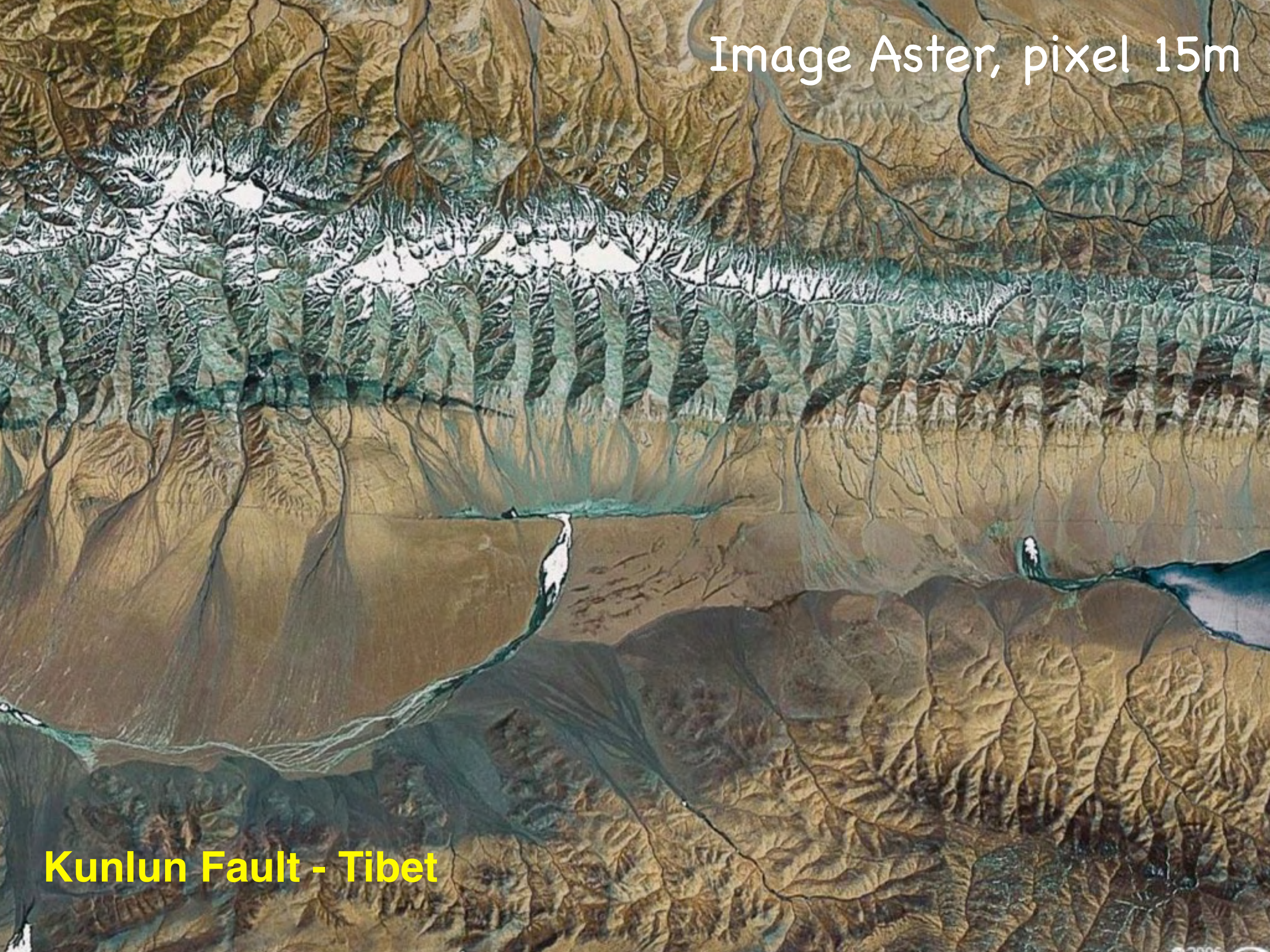


Image Aster, pixel 15m



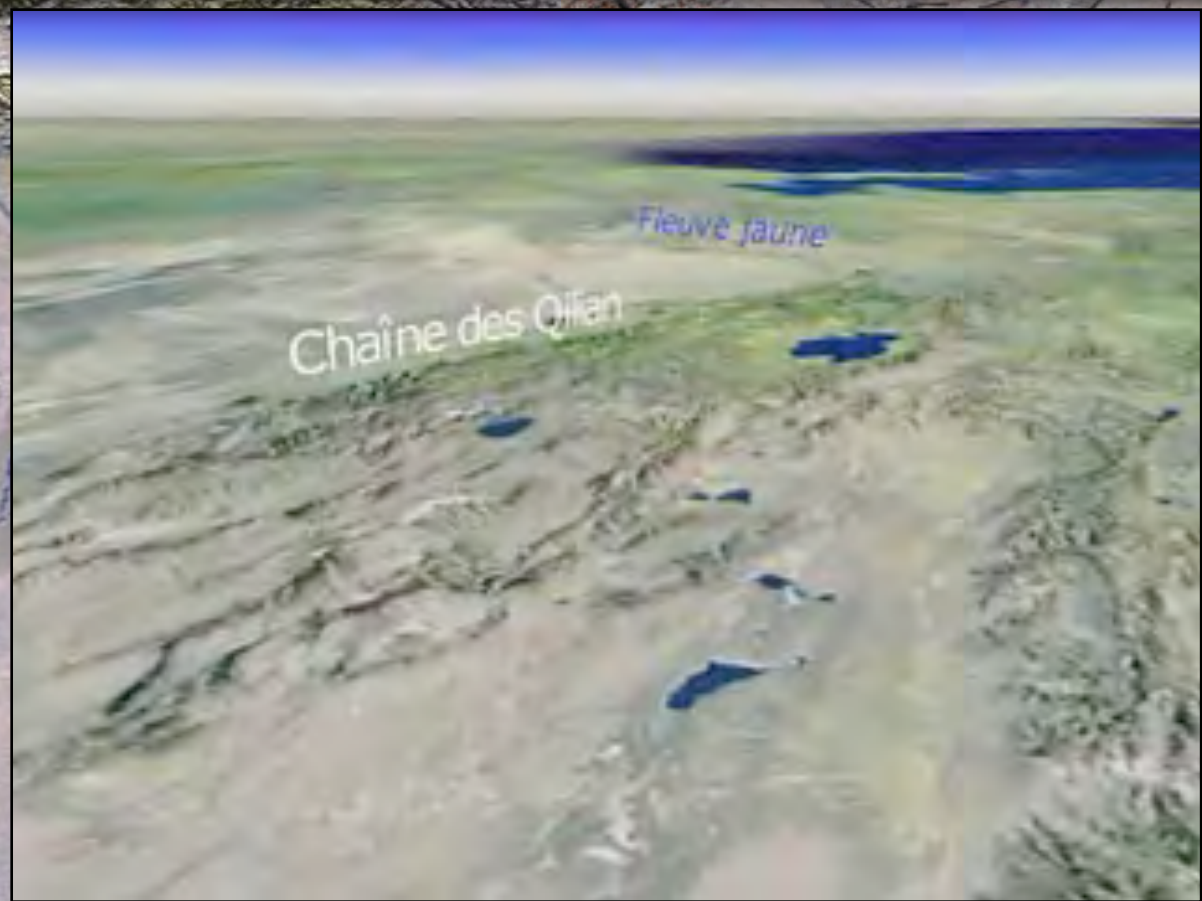
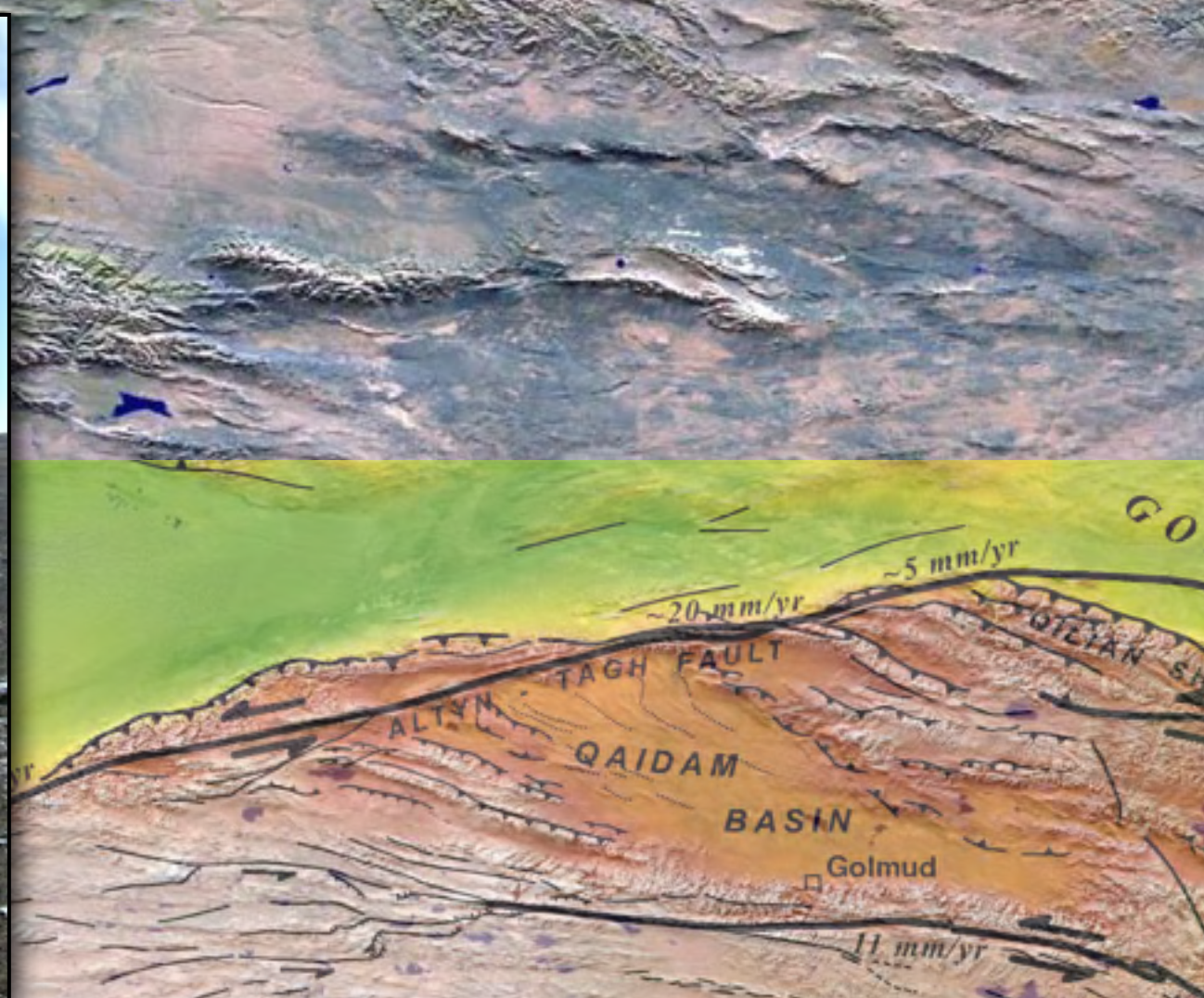
Kunlun Fault - Tibet

Les failles sont visibles sur le terrain



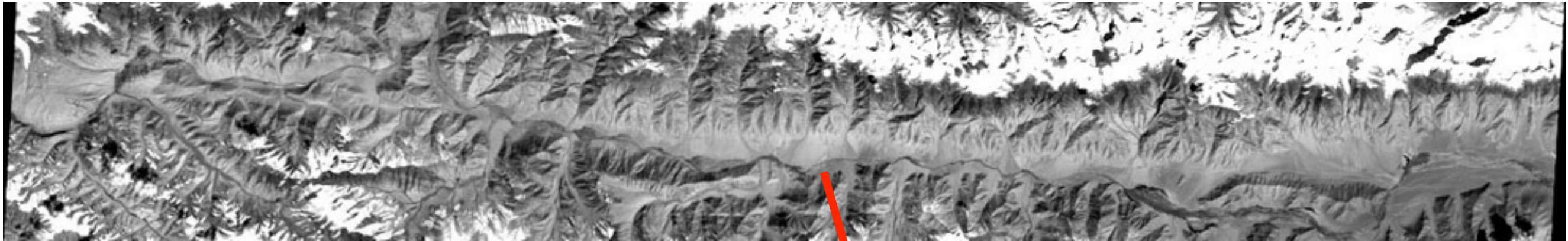
La déformation n'est pas distribuée de manière diffuse dans la croûte terrestre

La déformation se localise sur les **failles** actives qui découpent la lithospère (30km à 50km). Dans les zones non faillées, au premier ordre, la croûte se comporte comme une plaque rigide indéformable.

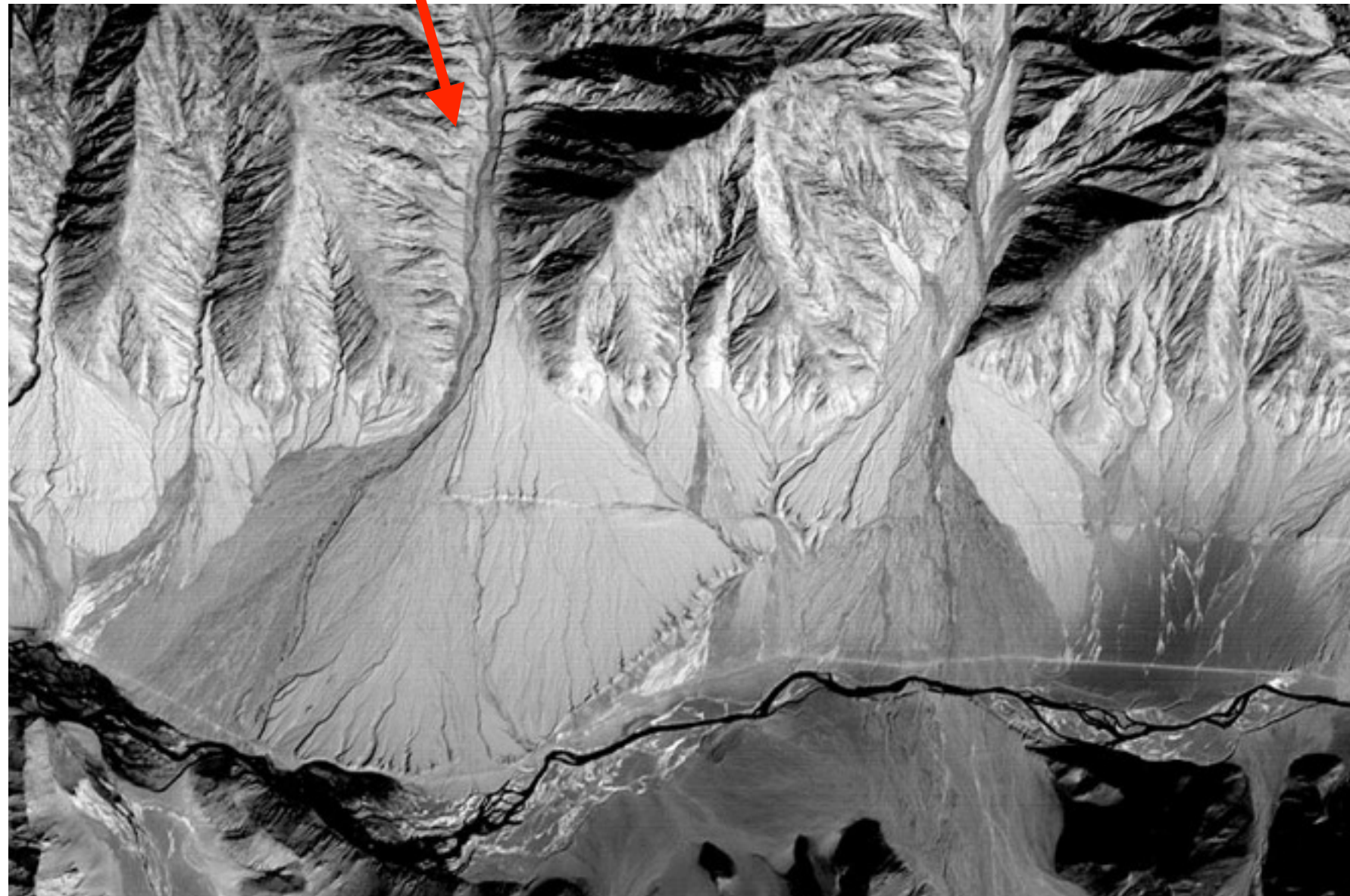


Déformations cumulées sur plusieurs cycles sismiques

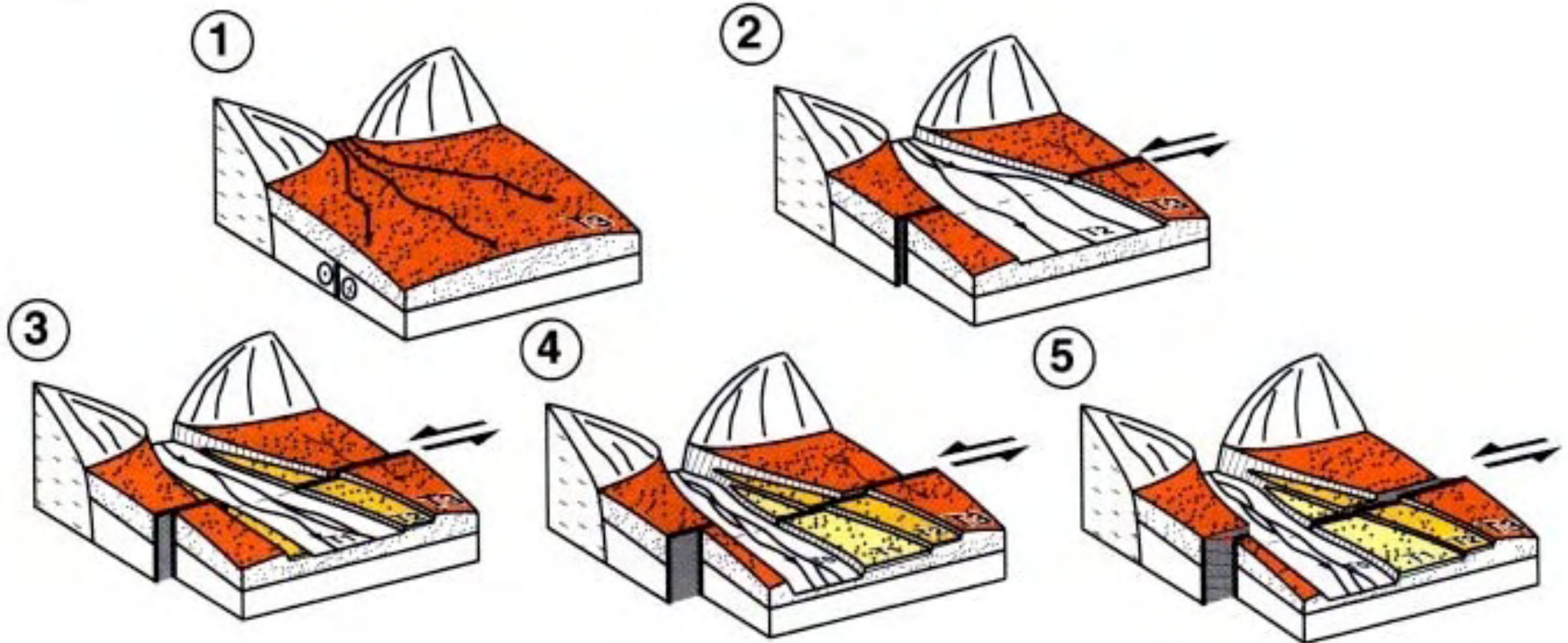
vitesse de glissement moyennes => décalages + datations



Faille décrochante
sénestre de l'Altyn Tagh



Le principe de la mesure



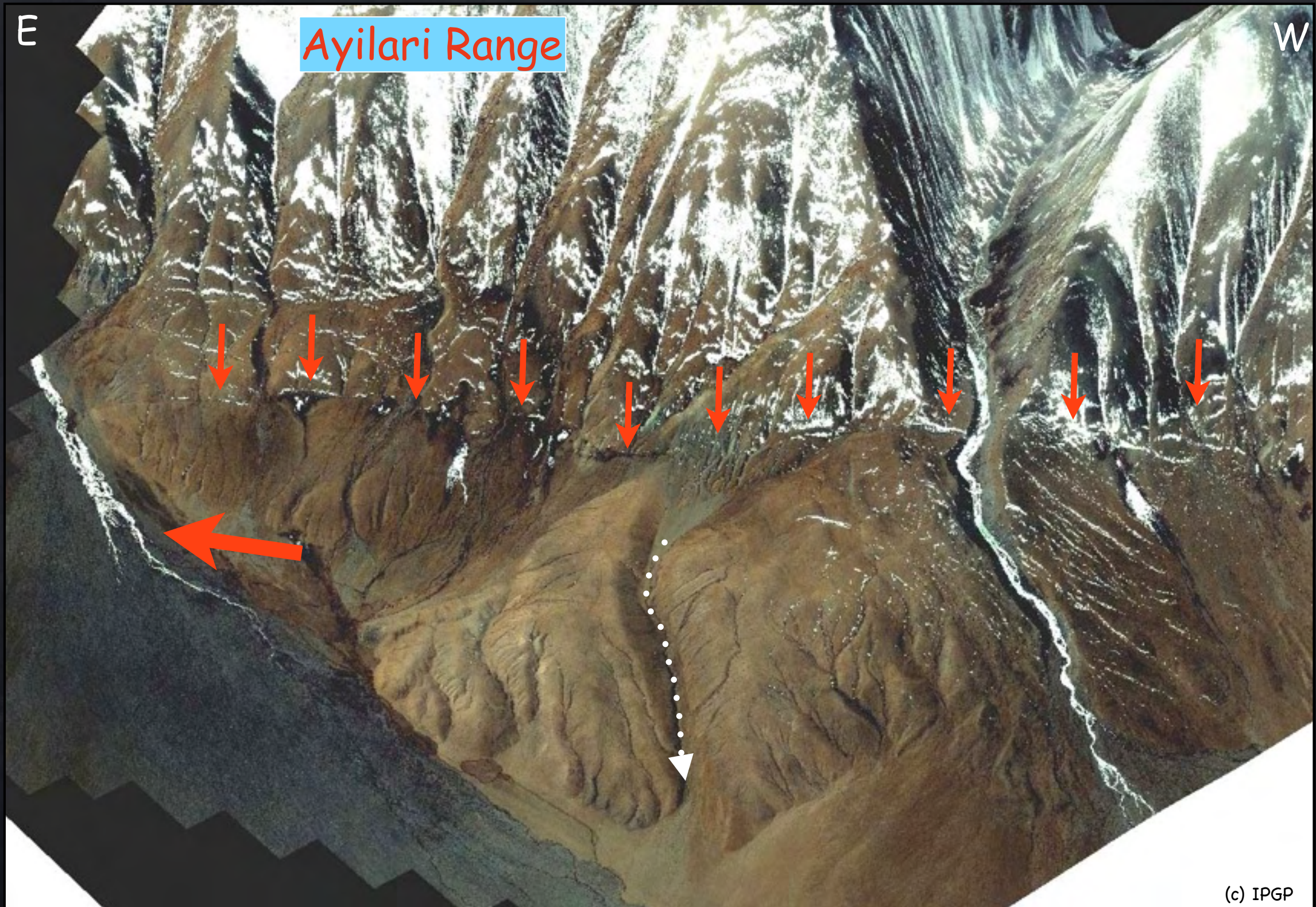


décalage à-gauche (senestre)
d'une terrasse alluviale

(c) Klinger 2009

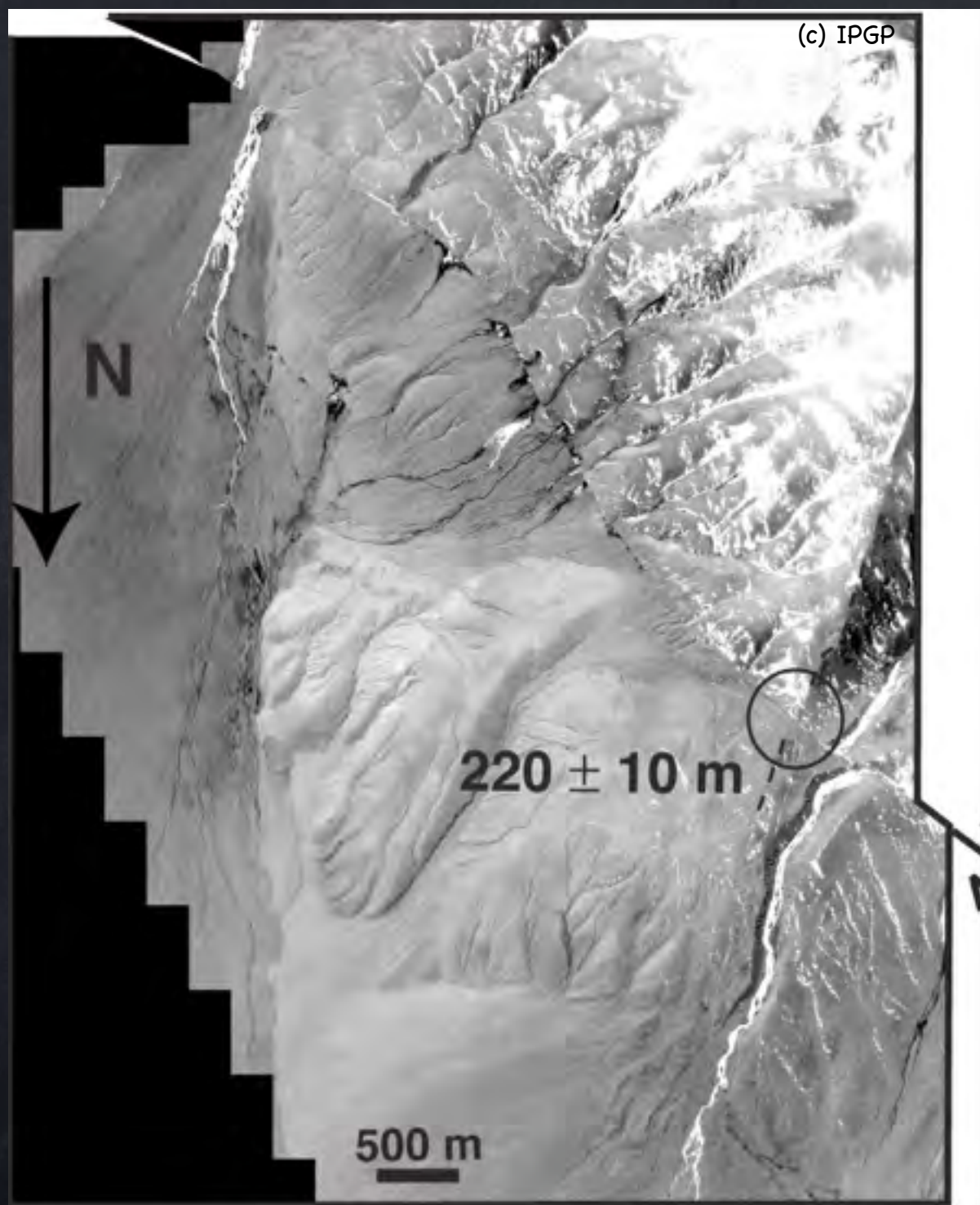


Manikala Valley

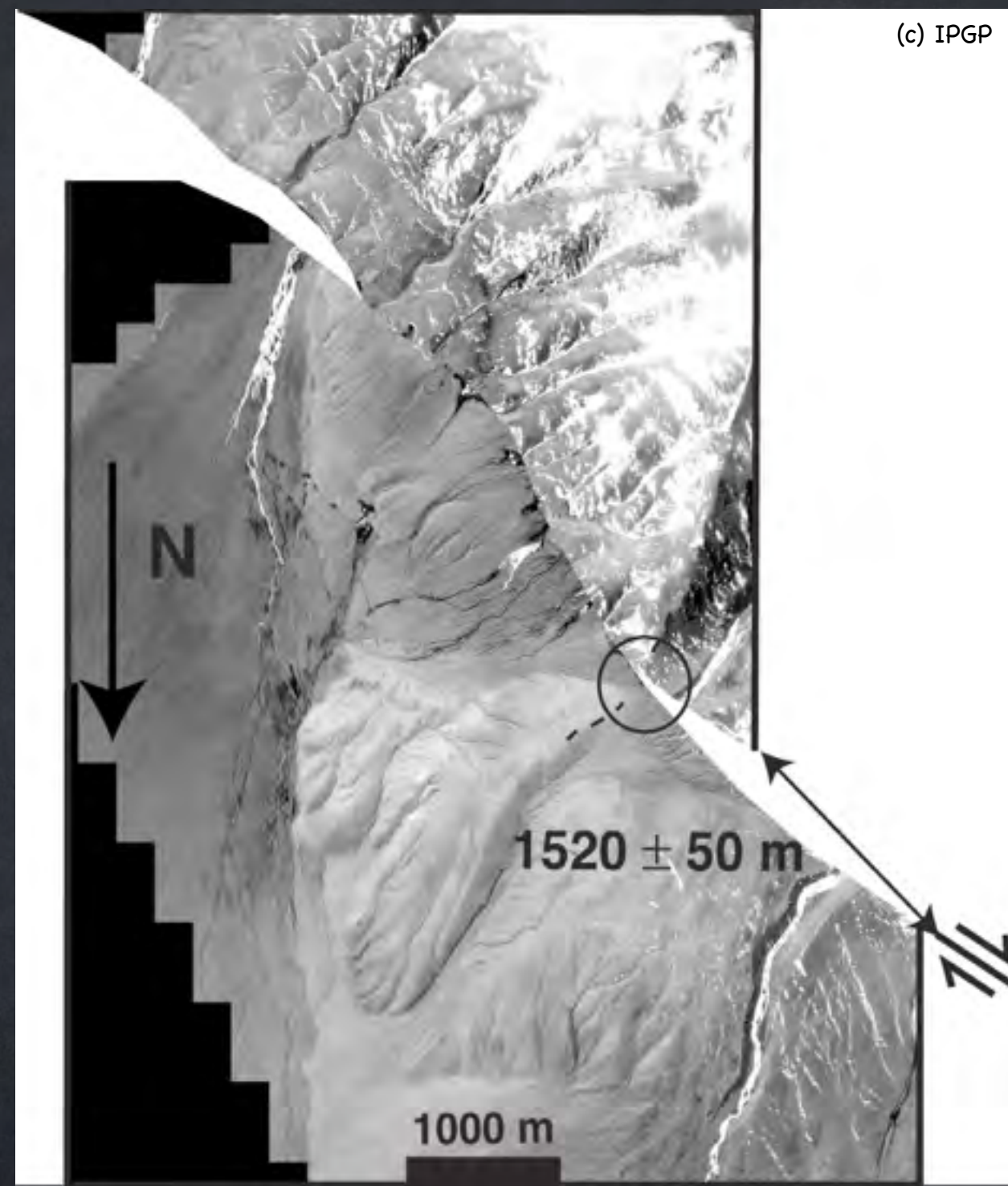


3D surface view

M1 offset = 220 ± 10 m

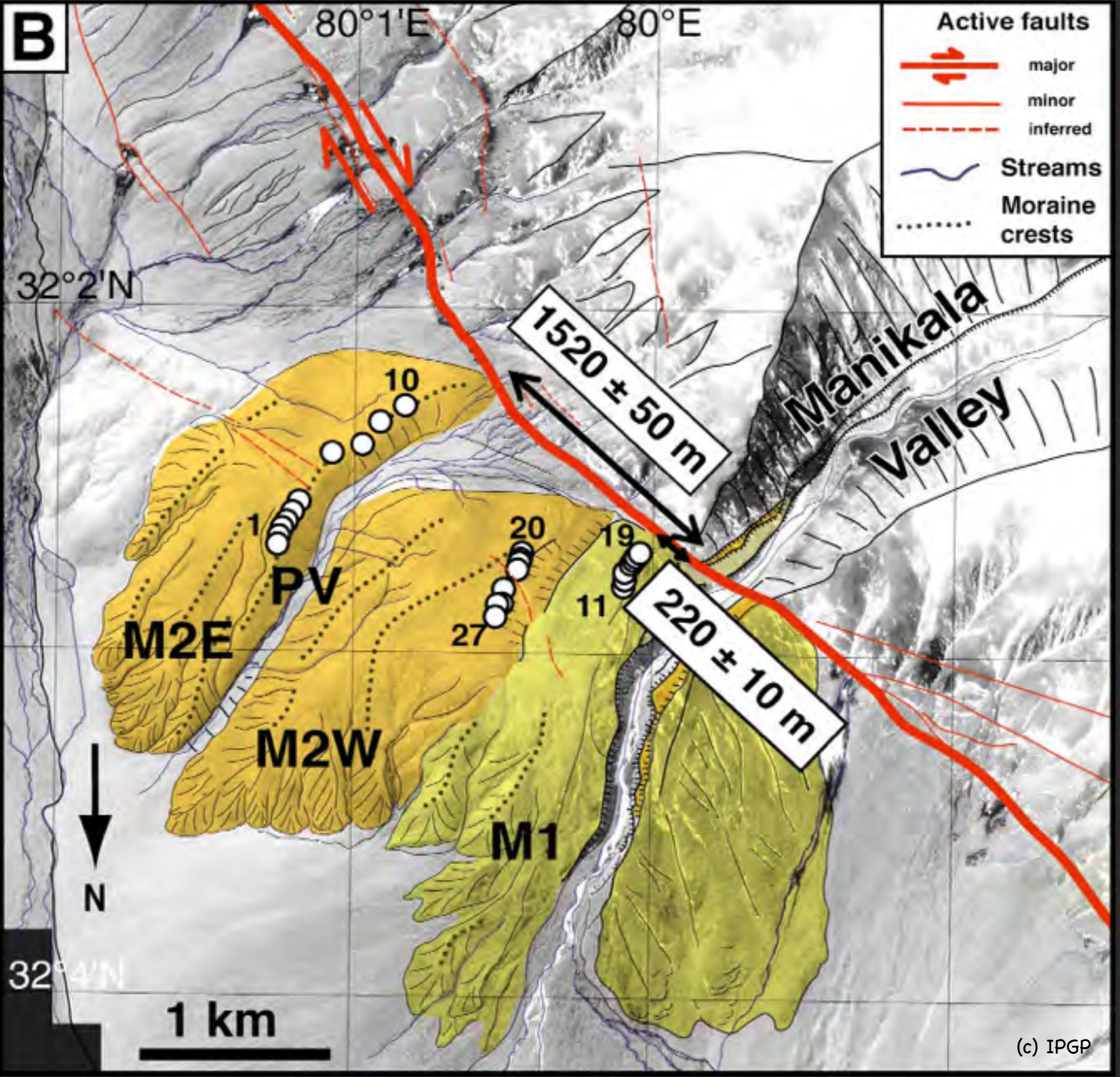


M2E offset = 1520 ± 50 m



1-m resolution IKONOS satellite images

(Chevalier et al., 2005)

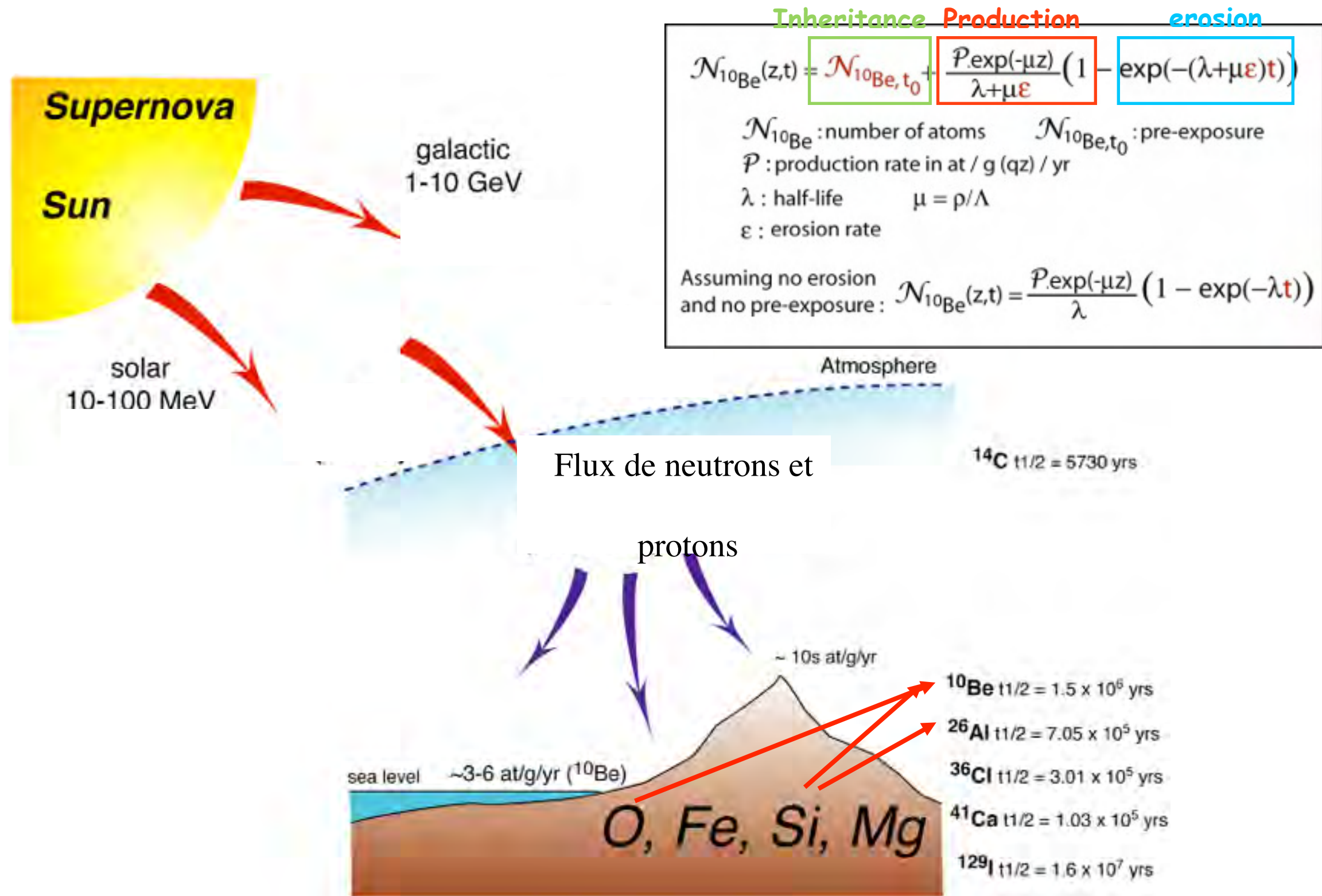


faire des cartes
 et ramasser des
 echantillons sur
 le terrain

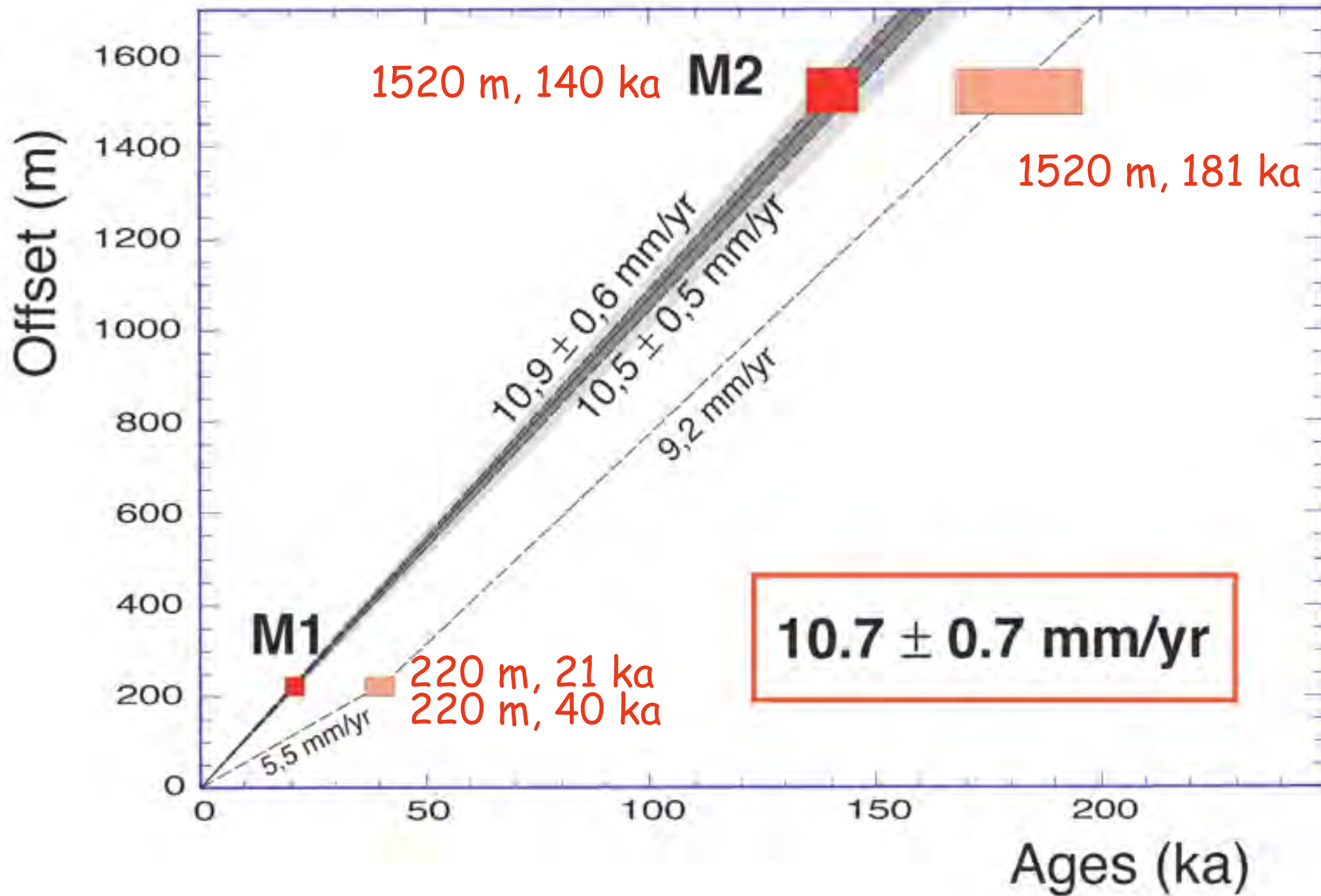
(Chevalier et al., 2005)

Datation des marqueurs morphologiques décalés

- Isotopes cosmogéniques -> qqs 100000 ans



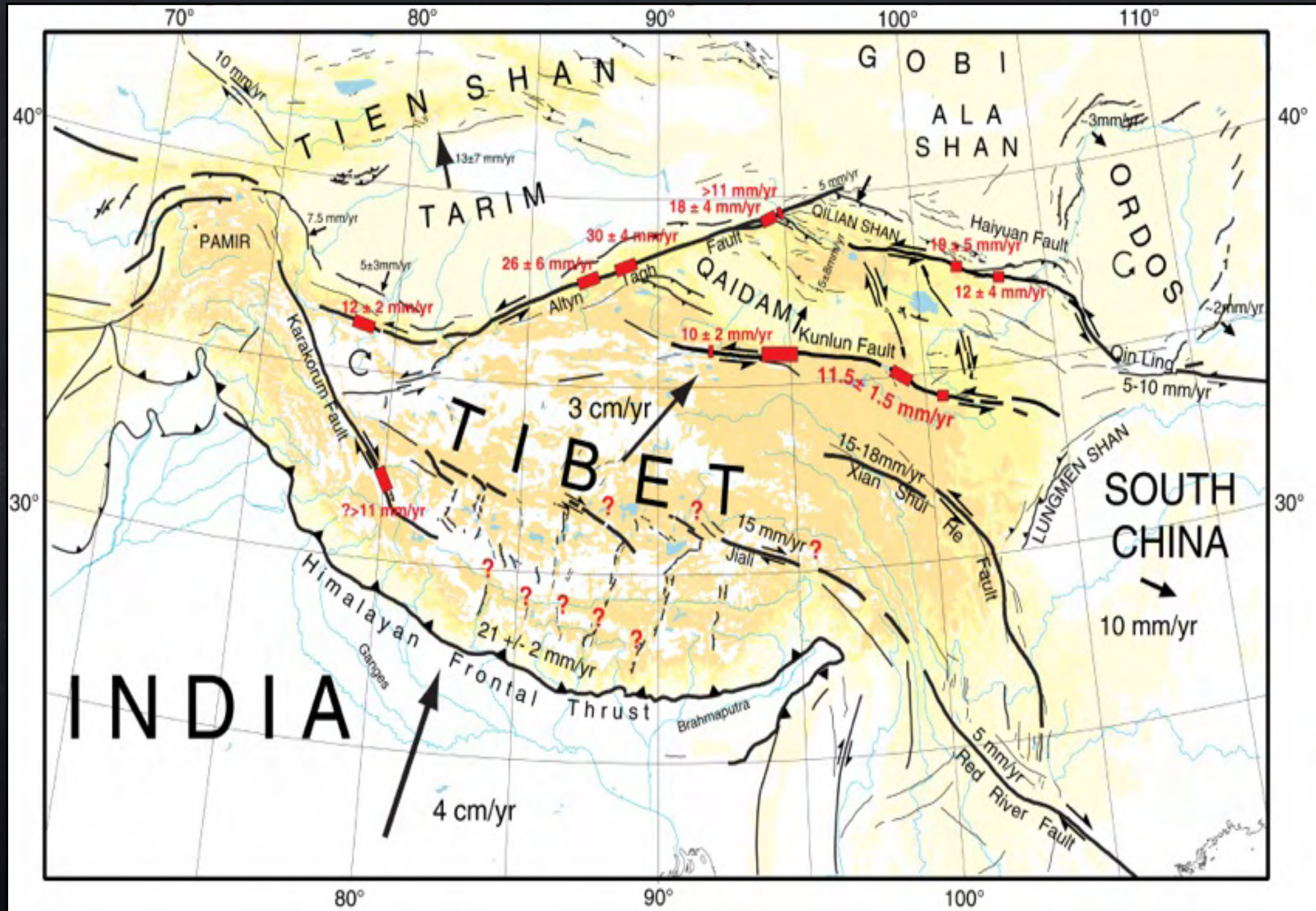
Datation du temps d'exposition aux rayons cosmiques

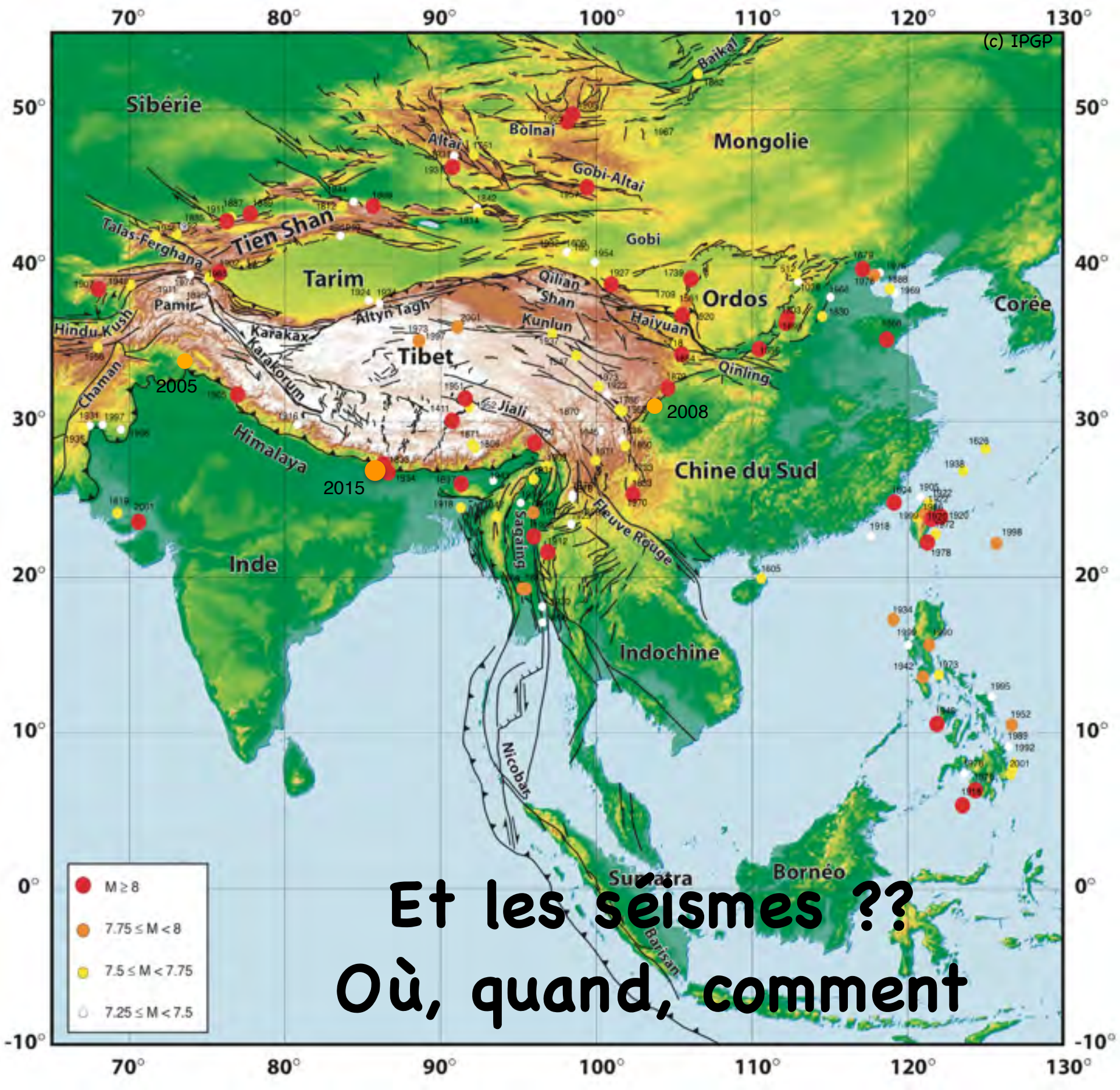


(Chevalier et al., 2005)

vitesse = decalage / age

La déformation est localisée sur les failles qui limitent des blocs très rigides qui se déforment peu
Les vitesses peuvent être $> 1\text{cm/an}$





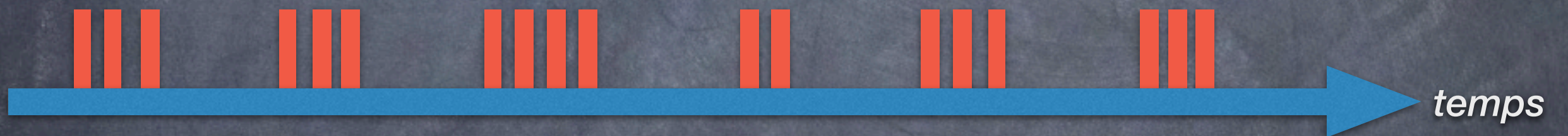
Et les séismes ??
Où, quand, comment

Succession temporelle des séismes

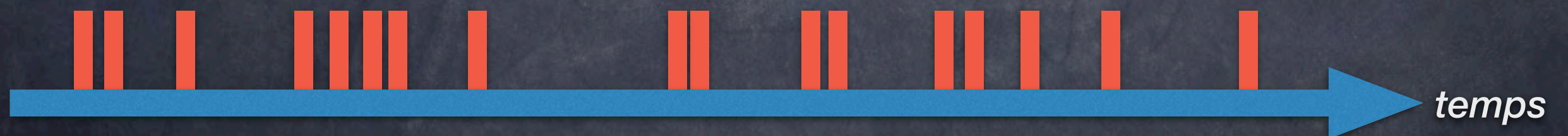
périodique



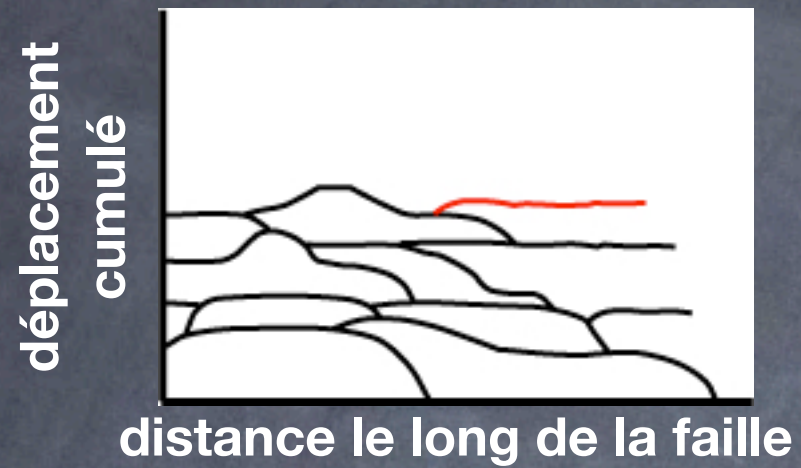
essaim temporel



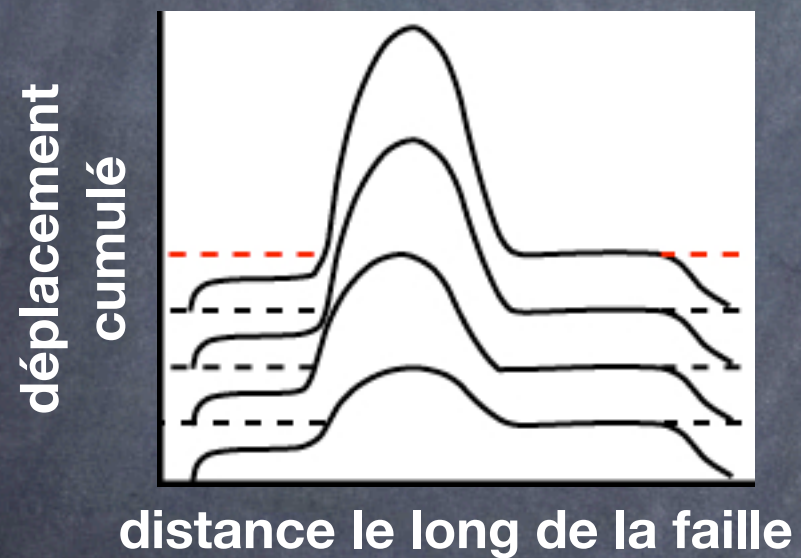
chaotique



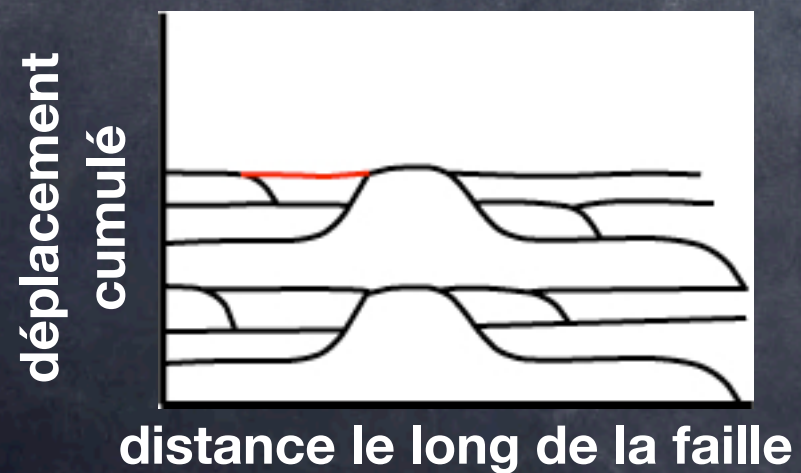
Répartition spatiale des séismes



répartition aléatoire

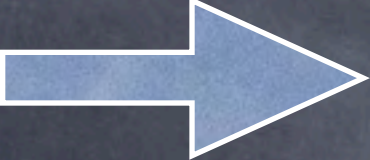


séisme caractéristique




glissement caractéristique

Pour essayer de progresser




Physique de la rupture: Comment est accommodée la déformation lors d'un séisme, quel est l'impact de la géométrie des failles sur la rupture co-sismique?



Les grands séismes sur le terrain, Mw7.8, Kunlun, 2001



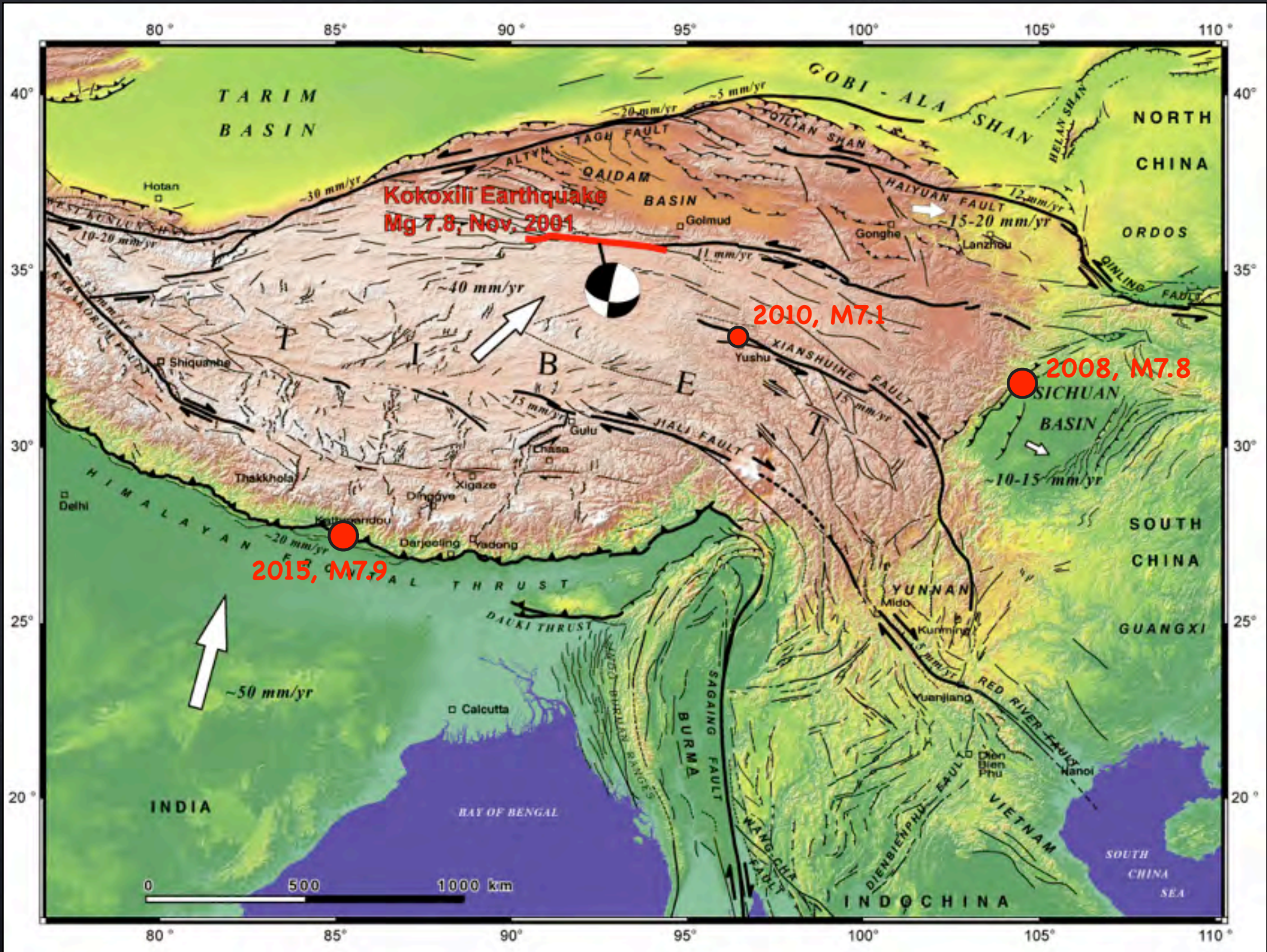
Mw 7.7, Balochistan 2013, cartographie d'un séisme depuis l'espace



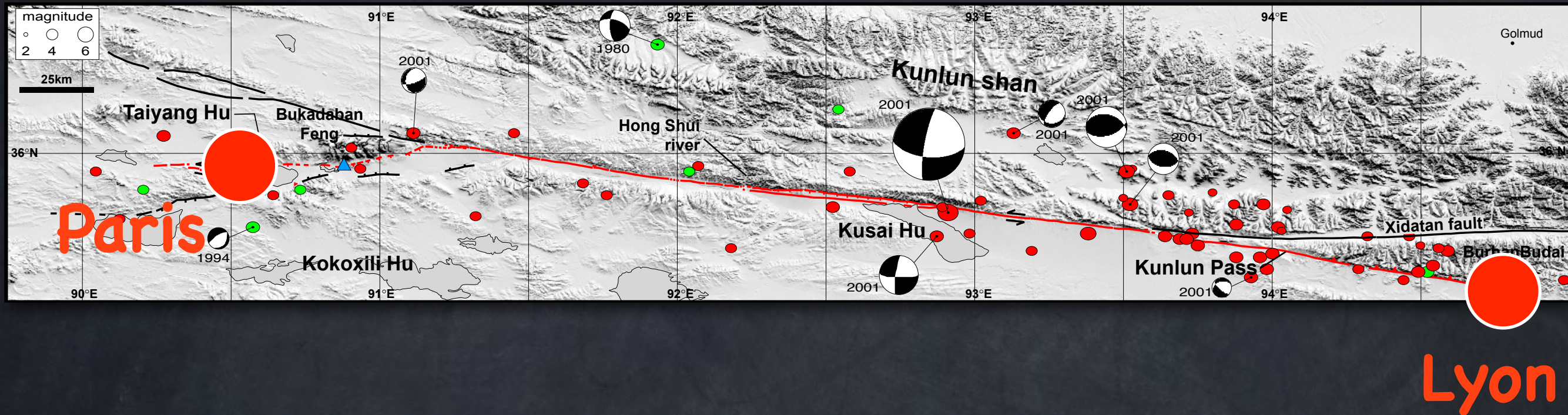
Séquences sismiques au cours du temps: Comment les séismes se répètent-ils au cours du temps?



Fouiller le passé pour retrouver les traces des séismes anciens



La rupture du Kunlun, l'exemple d'un décrochement



Une rupture de 430 km de long

Un déplacement moyen de 4.5m avec un maximum de 10m

une rupture qui se propage à 4km/s (14400 km/h)

altitude supérieure à 4000m

Observations de terrain



(c) Klinger Y.

Observations de terrain



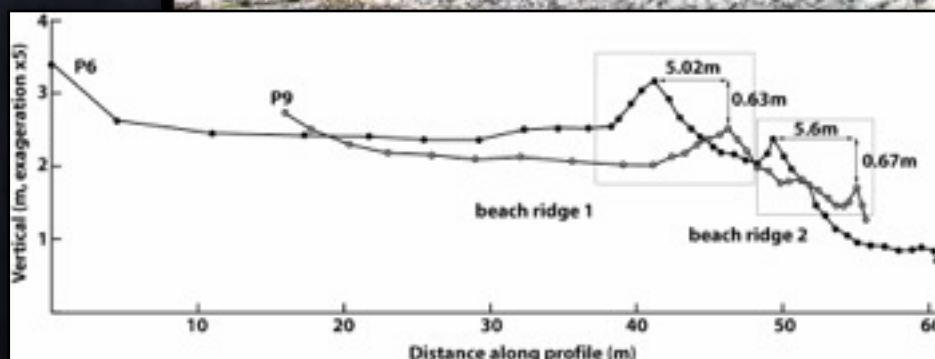
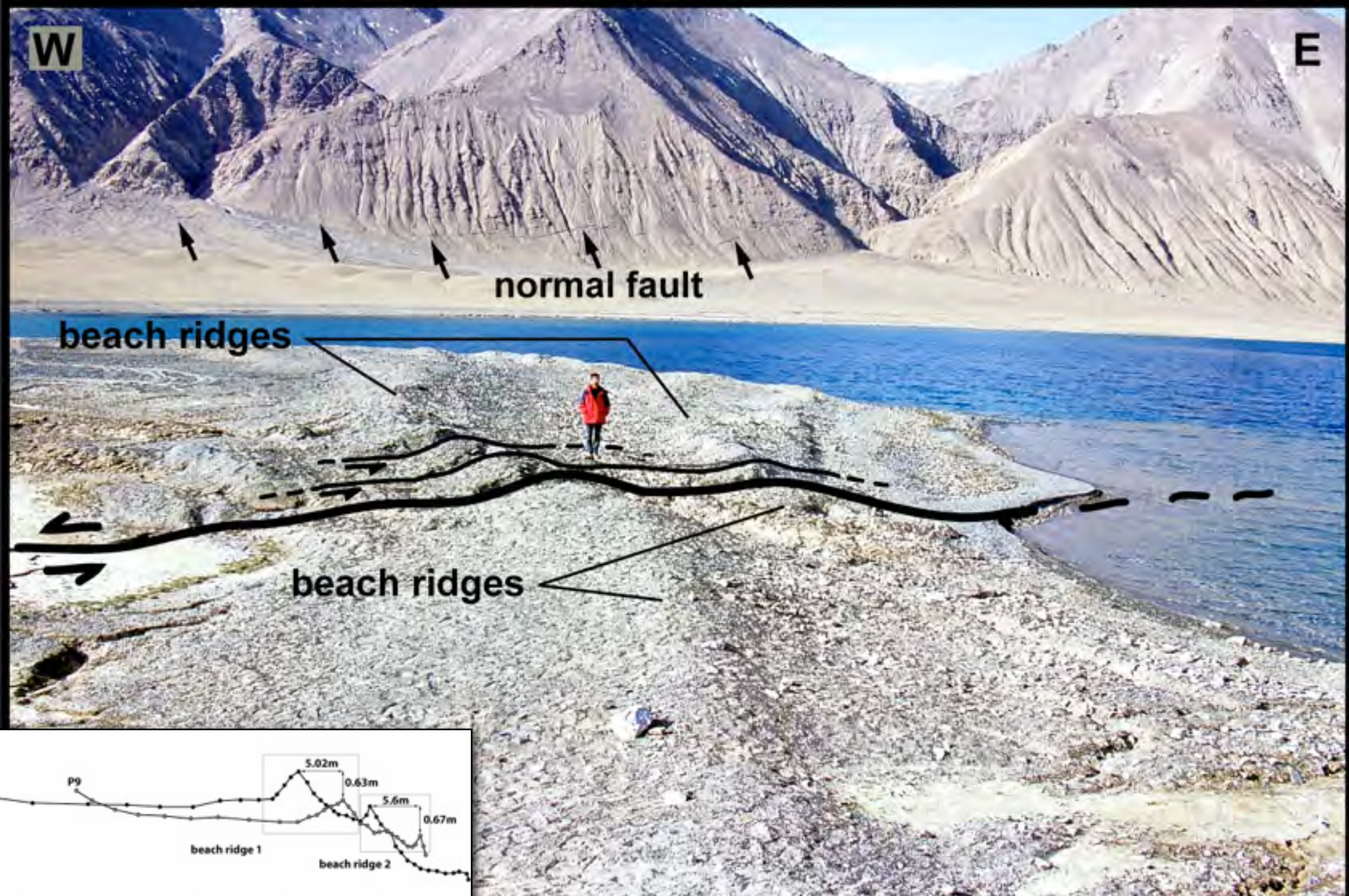
(c) Klinger Y.

Observations de terrain

(c) Klinger Y.



Observations de terrain



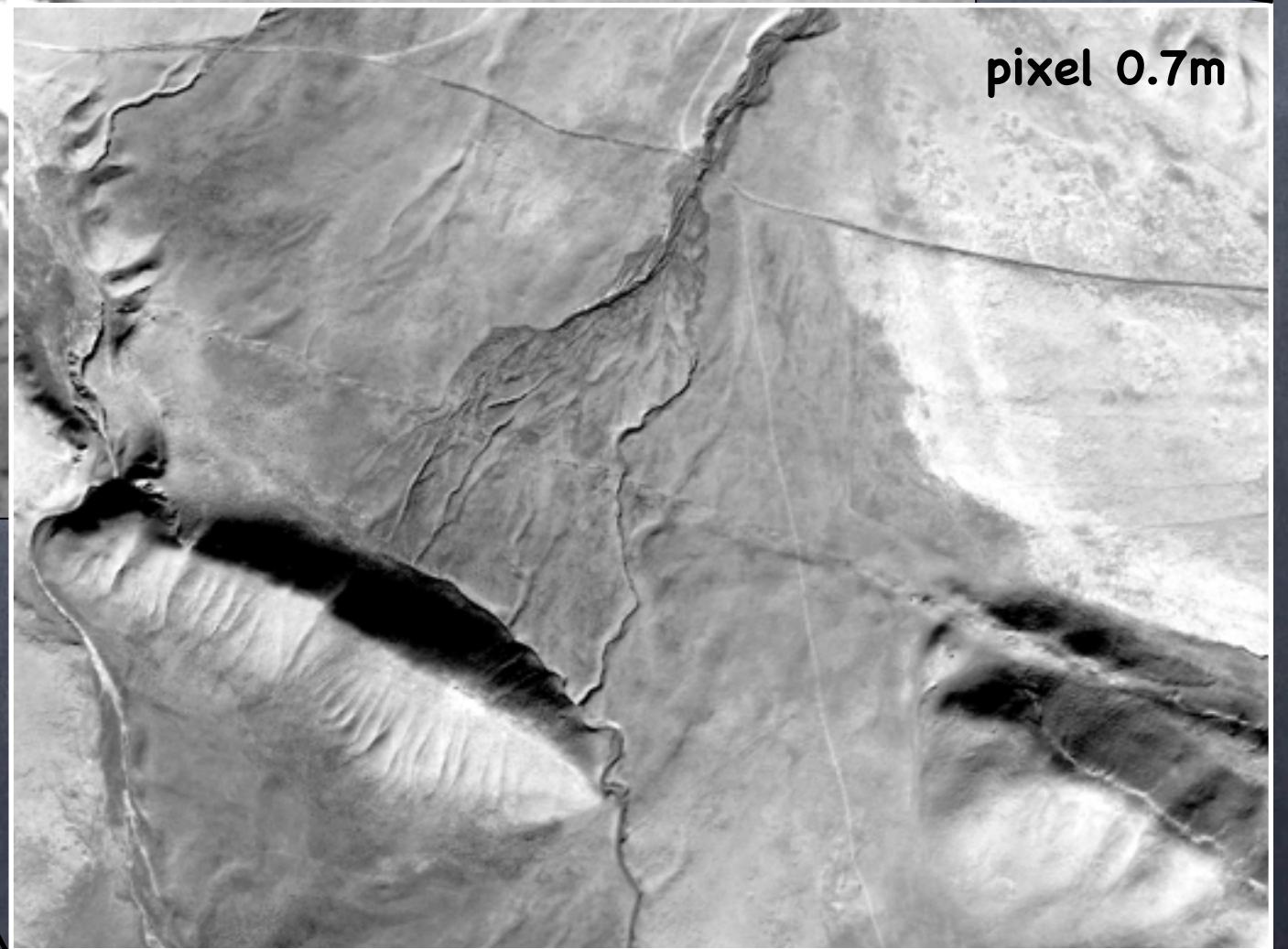
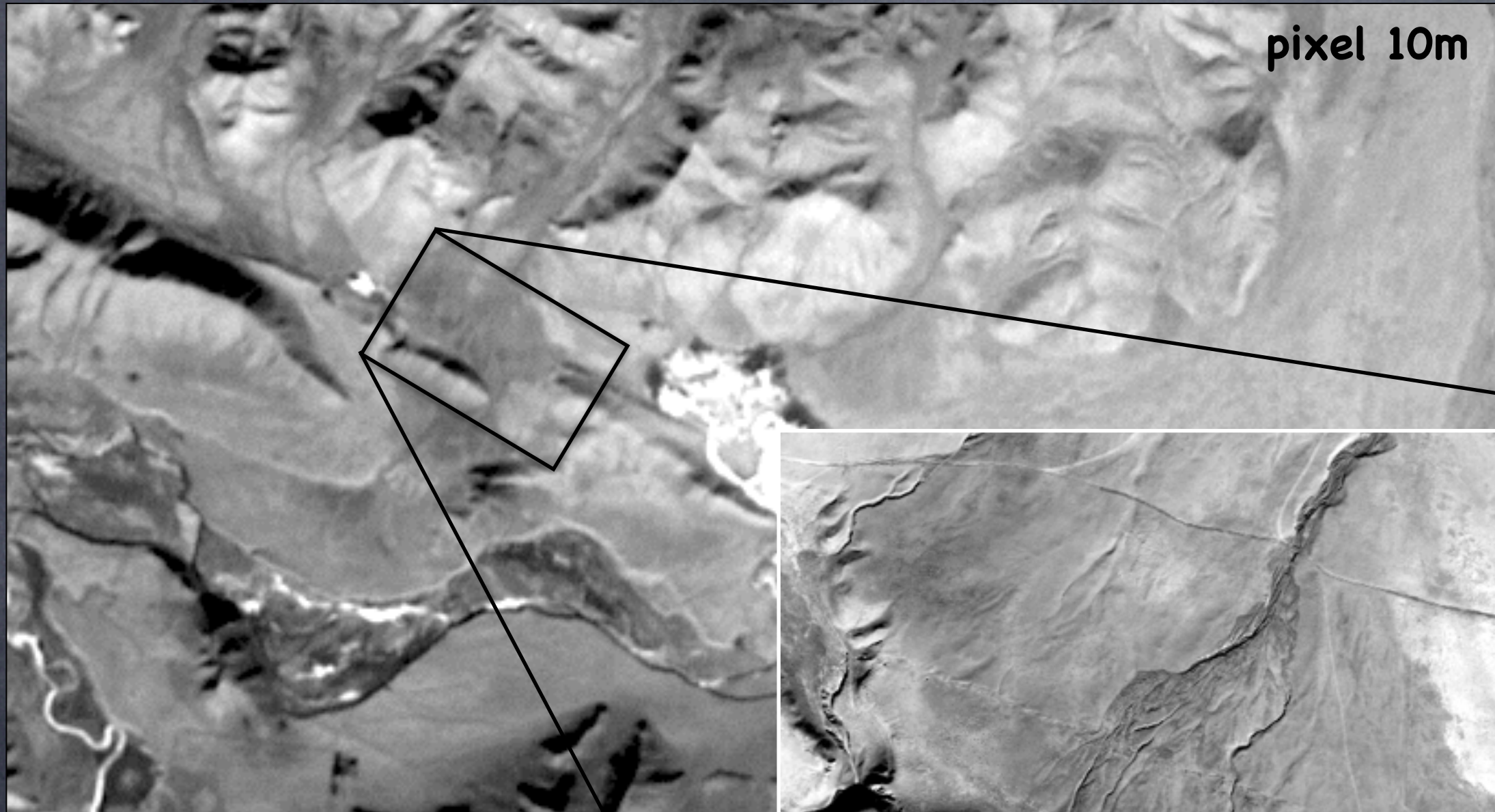
(Klinger et al., 2005)

Les accès ne sont pas toujours très faciles



(c) Klinger Y.

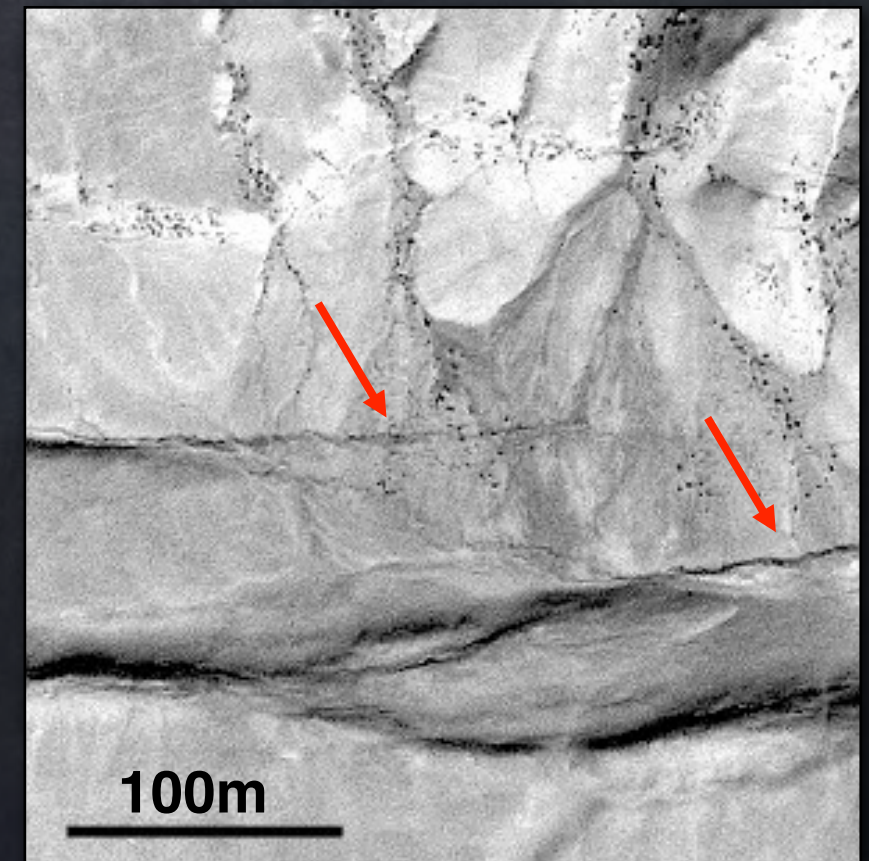
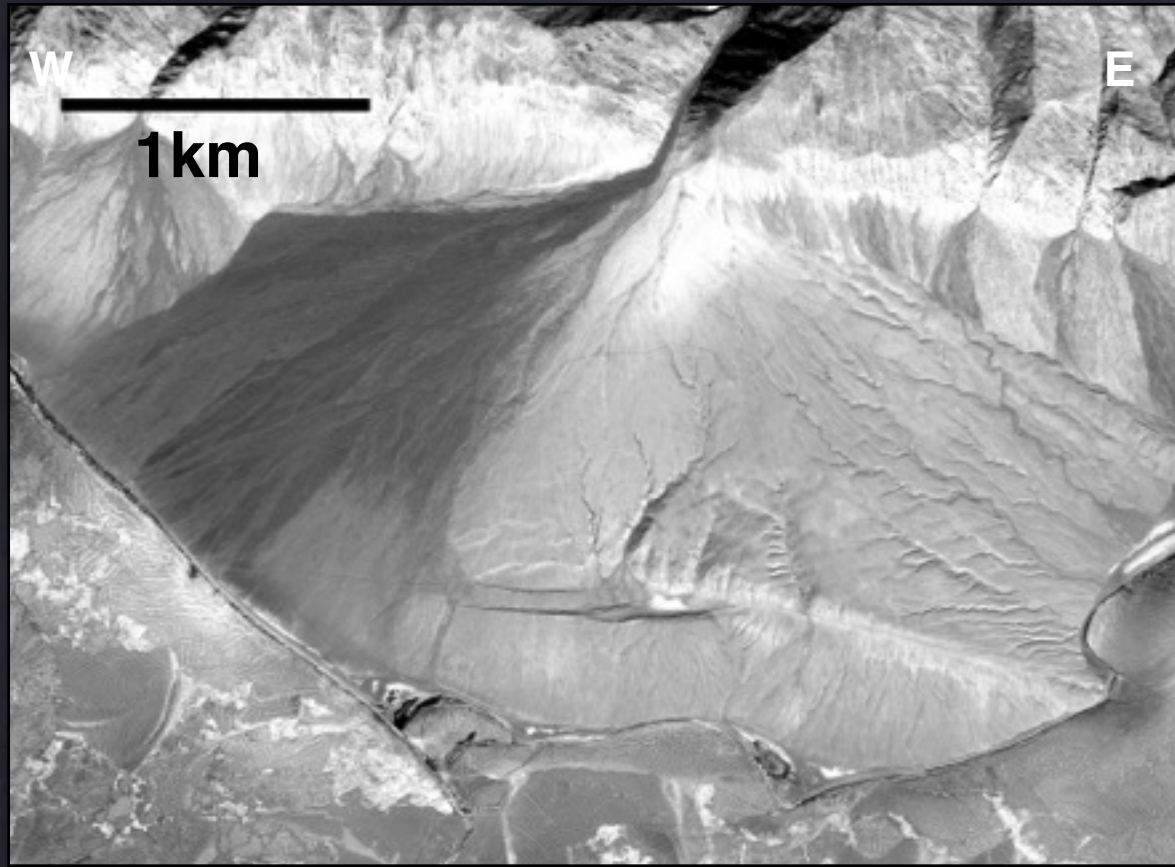
L'imagerie satellitaire



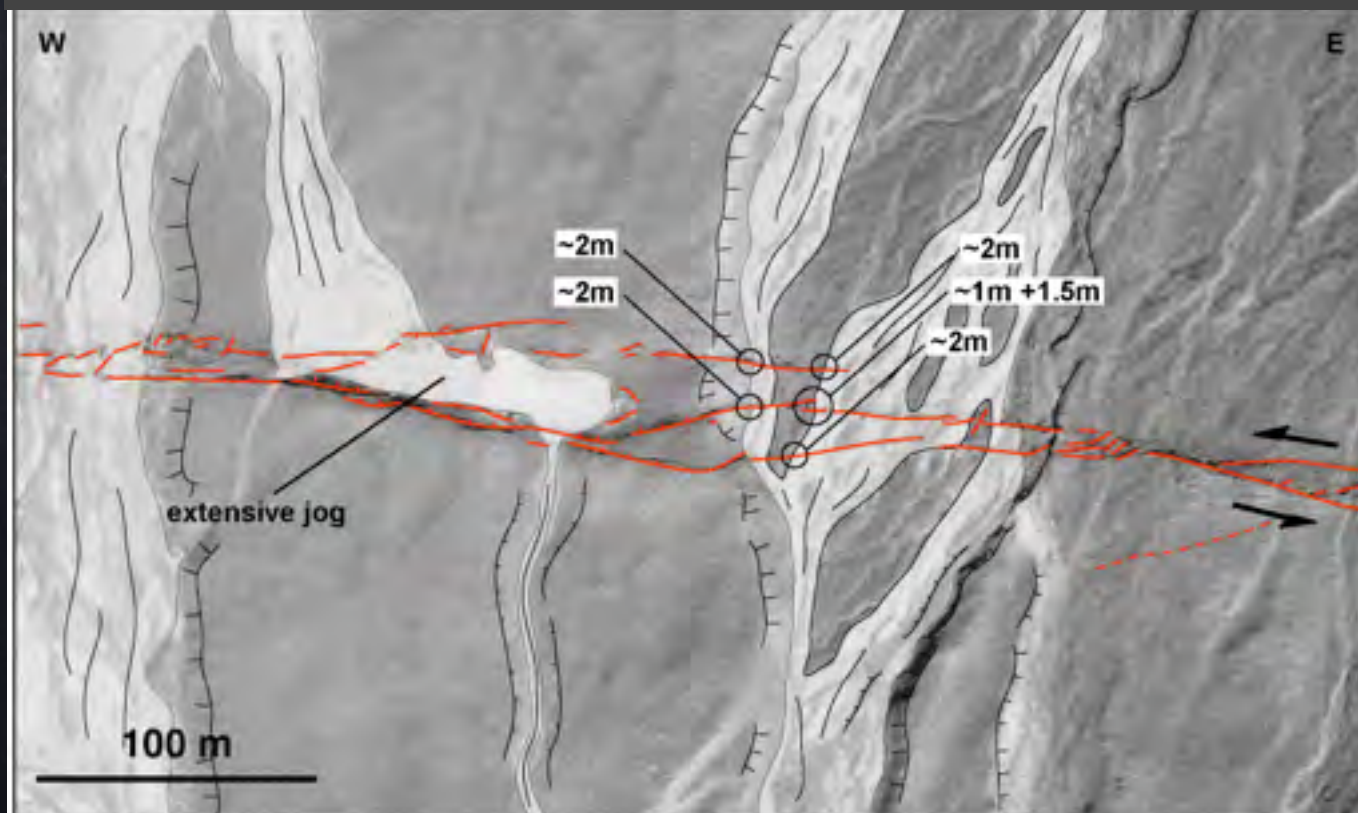
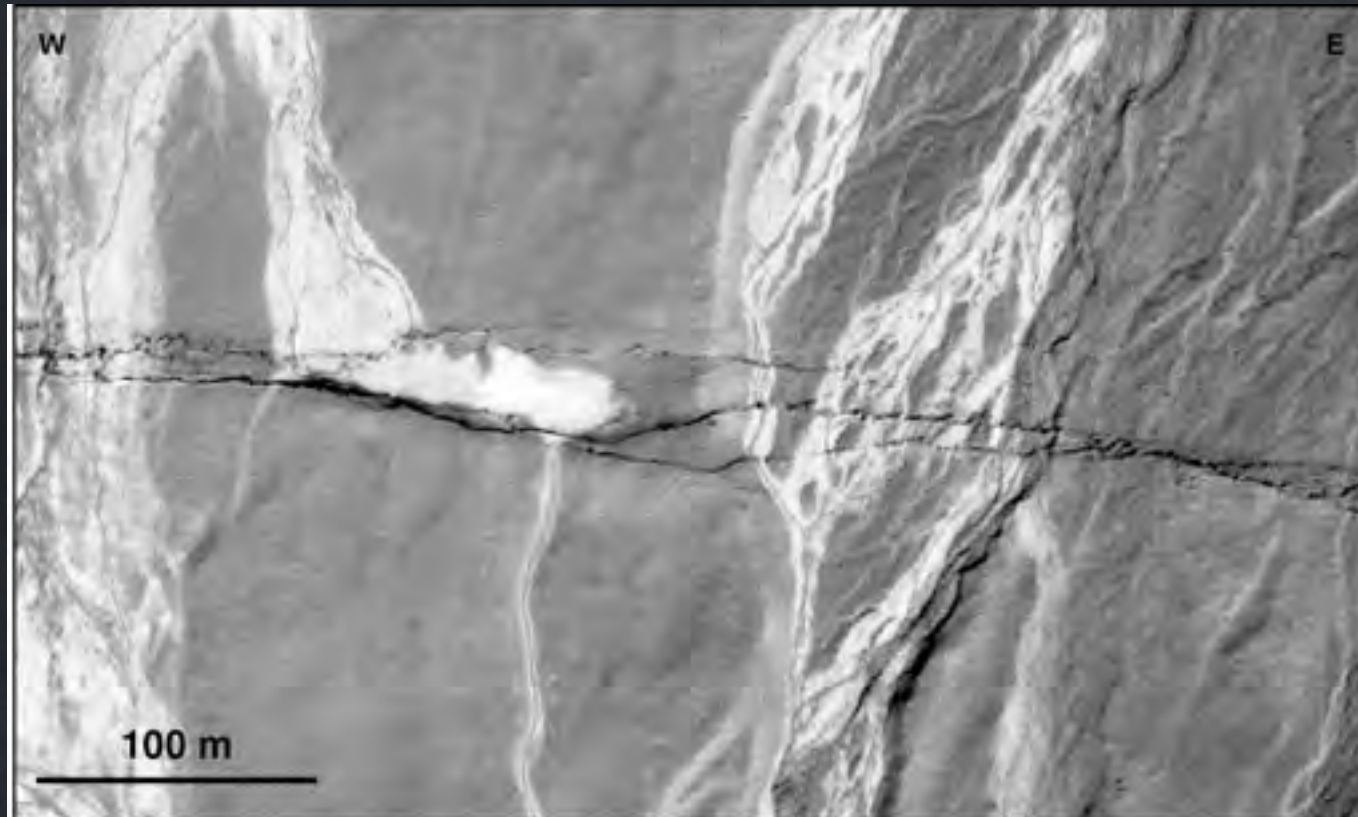
400m

En 10 ans, la résolution a été multipliée par 10.

La rupture vue de l'espace



Détails du séisme vus depuis
l'espace
Satellite optique à très haute
résolution (<1m)



W

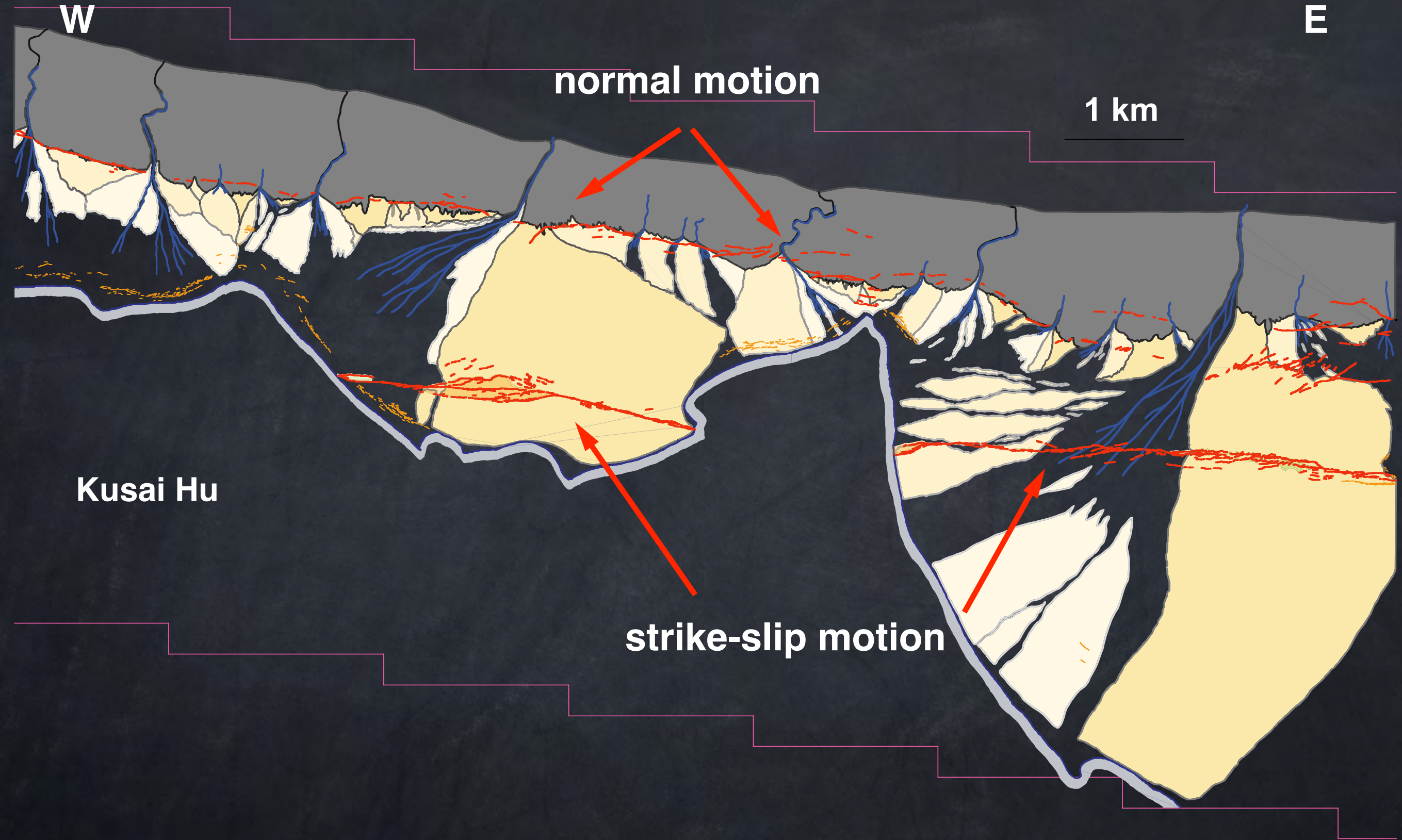
E

normal motion

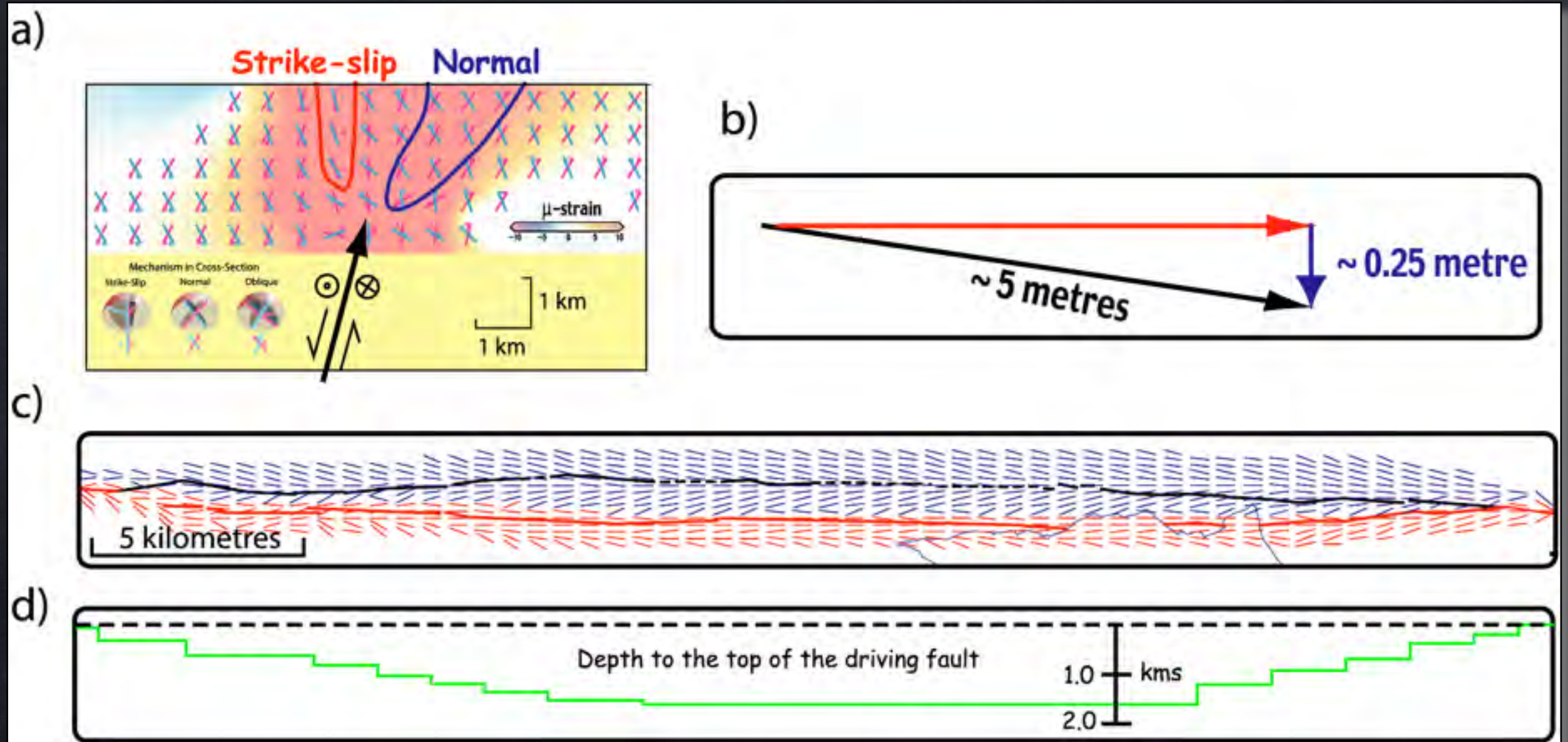
1 km

strike-slip motion

Kusai Hu

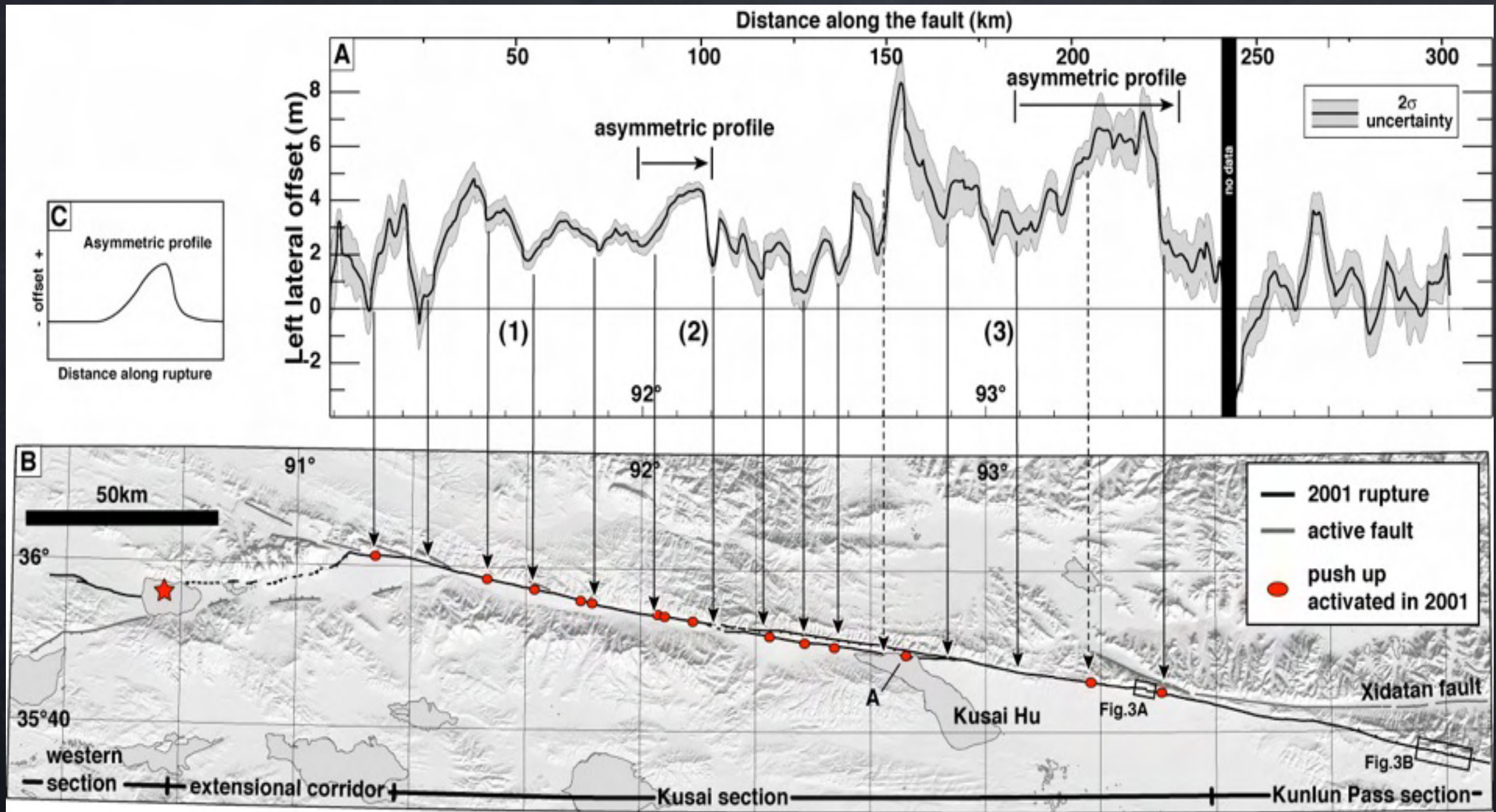


Modèle mécanique de la rupture sismique

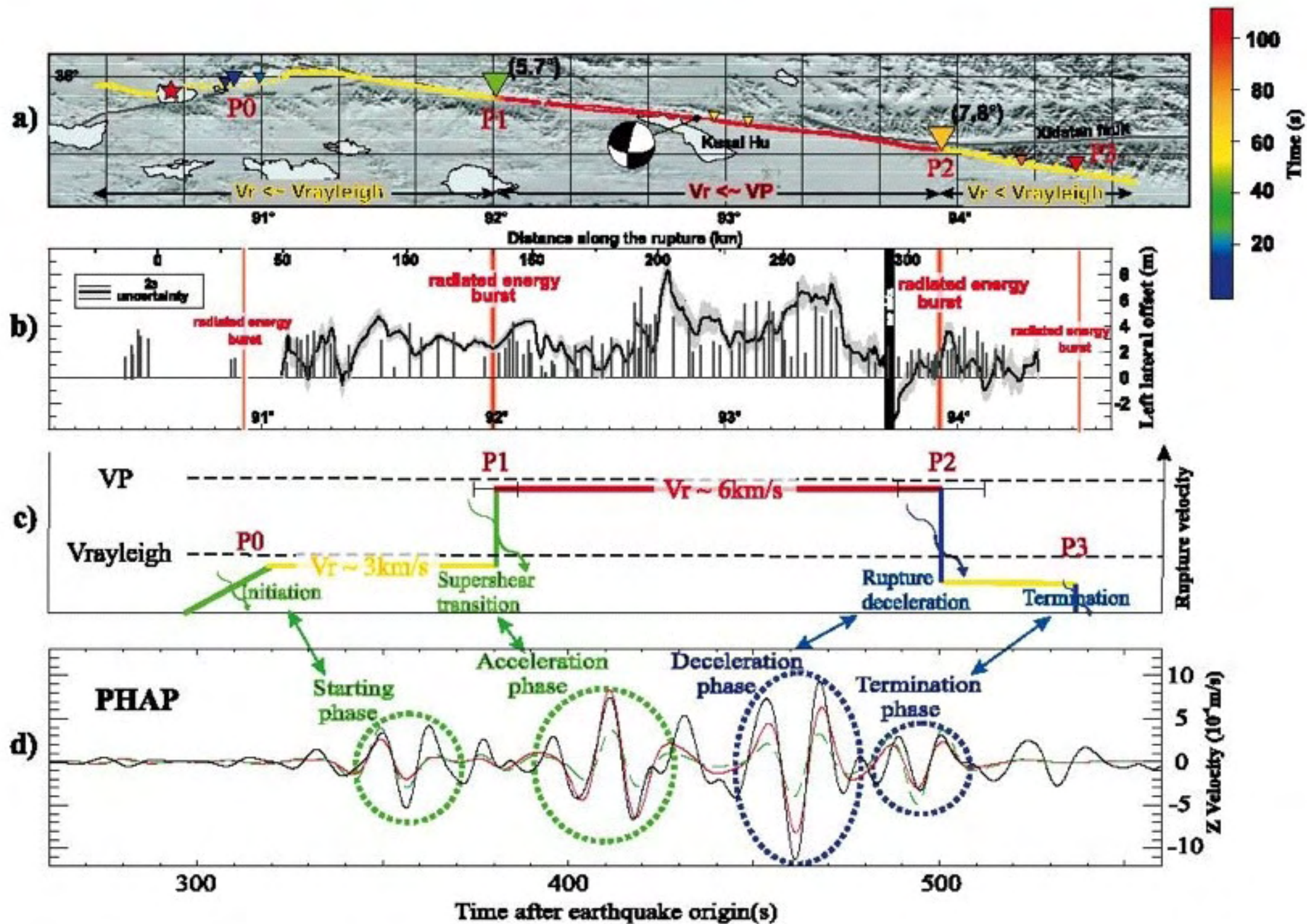


(King et al., 2005)

on peut mesurer avec précision le déplacement tout au long de la faille



(Klinger et al., 2006)



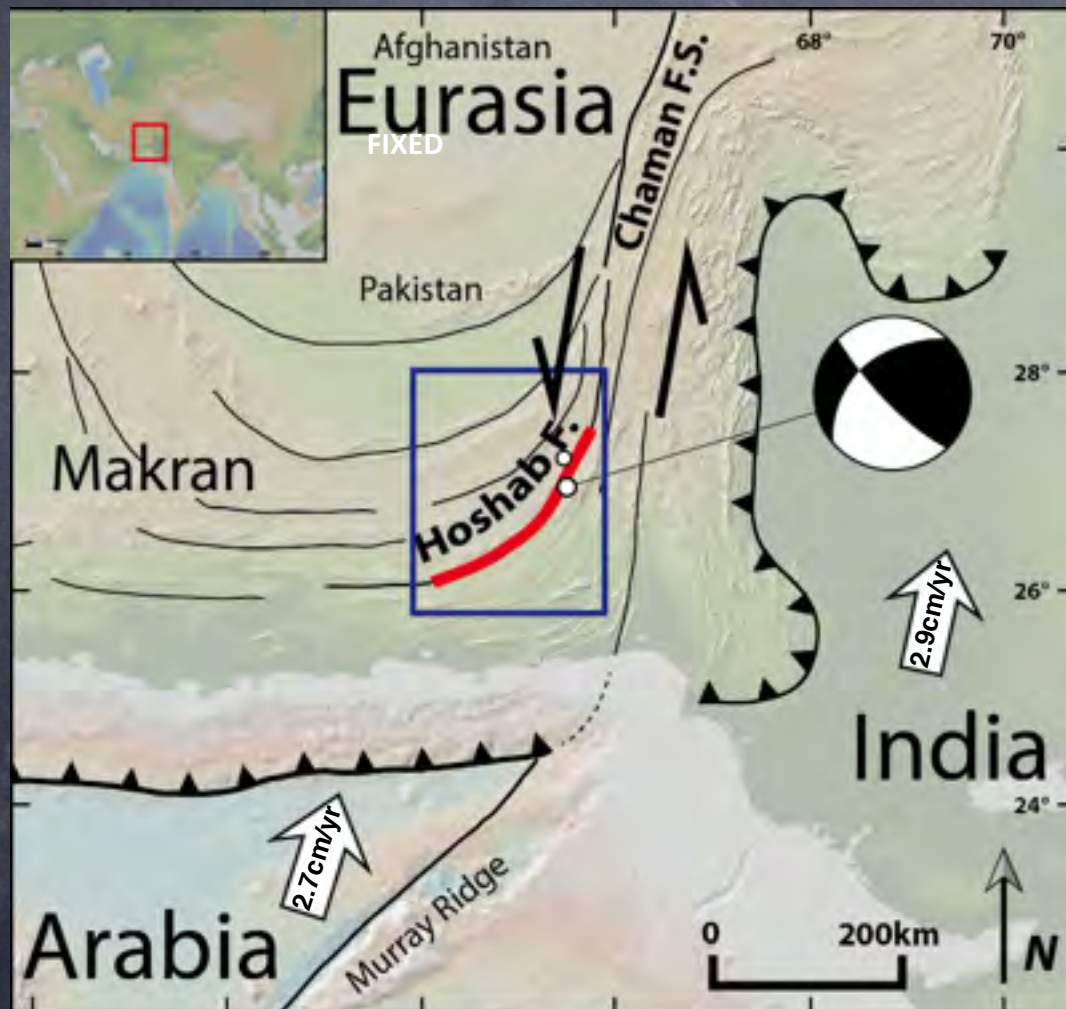
(Vallée et al., 2008)

la vitesse de rupture, contrôlée par la géométrie de la faille, change pendant le séisme.

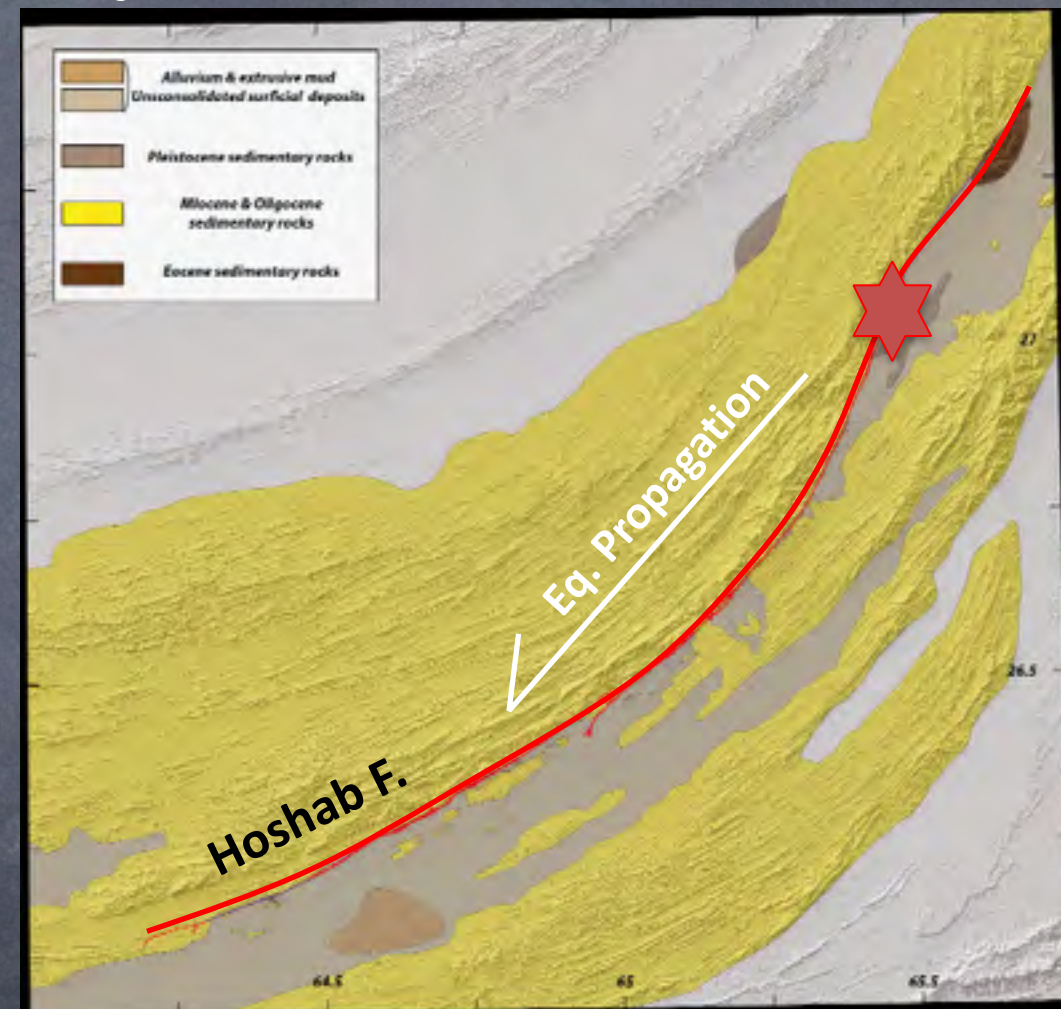
Utiliser les séries temporelles d'images pour quantifier plus systématiquement les ruptures de surface

Mw 7.7, 2013, Séisme du Balochistan

Modified from Avouac *et al.*, 2014

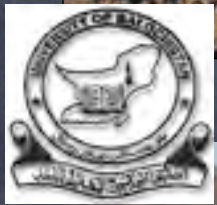


Panagos *et al.*, 2011



~200 km de rupture, principalement décrochante, avec un faible mvt vertical

Ruptures de surface



photos du Prof. Abdul S. Khan
et de ses étudiants de l' Université du
Balochistan:

Din M. Kakar
MohibUllah Baloch
Muhammad Shafeh

Cartographie de la rupture de surface (1:500 scale)

Image pixel size < 1m



Cartographie de la rupture de surface (1:500 scale)

Image pixel size < 1m



Cartographie de la rupture de surface (1:500 scale)

Image pixel size < 1m



Correlation d'images optiques

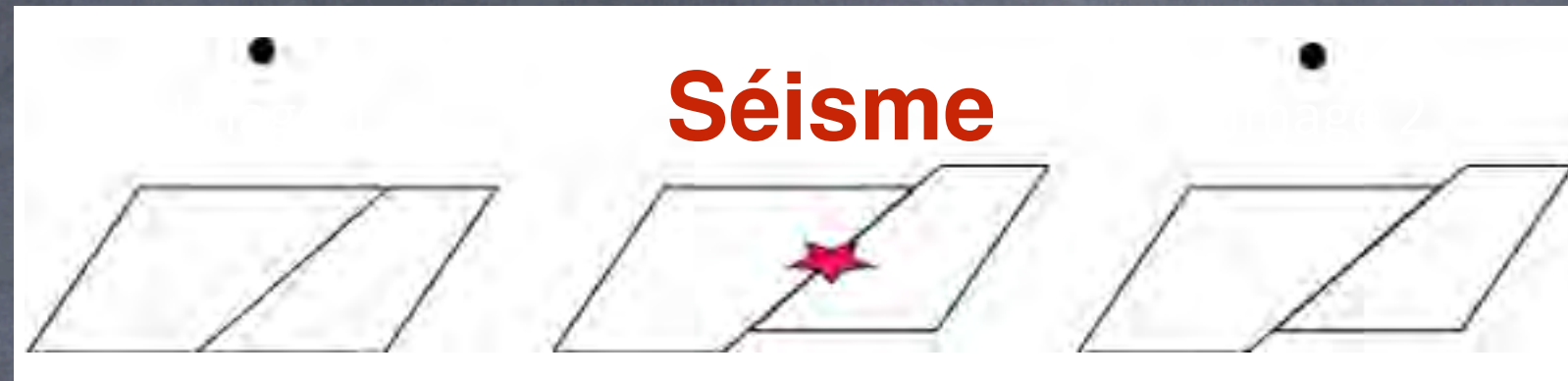
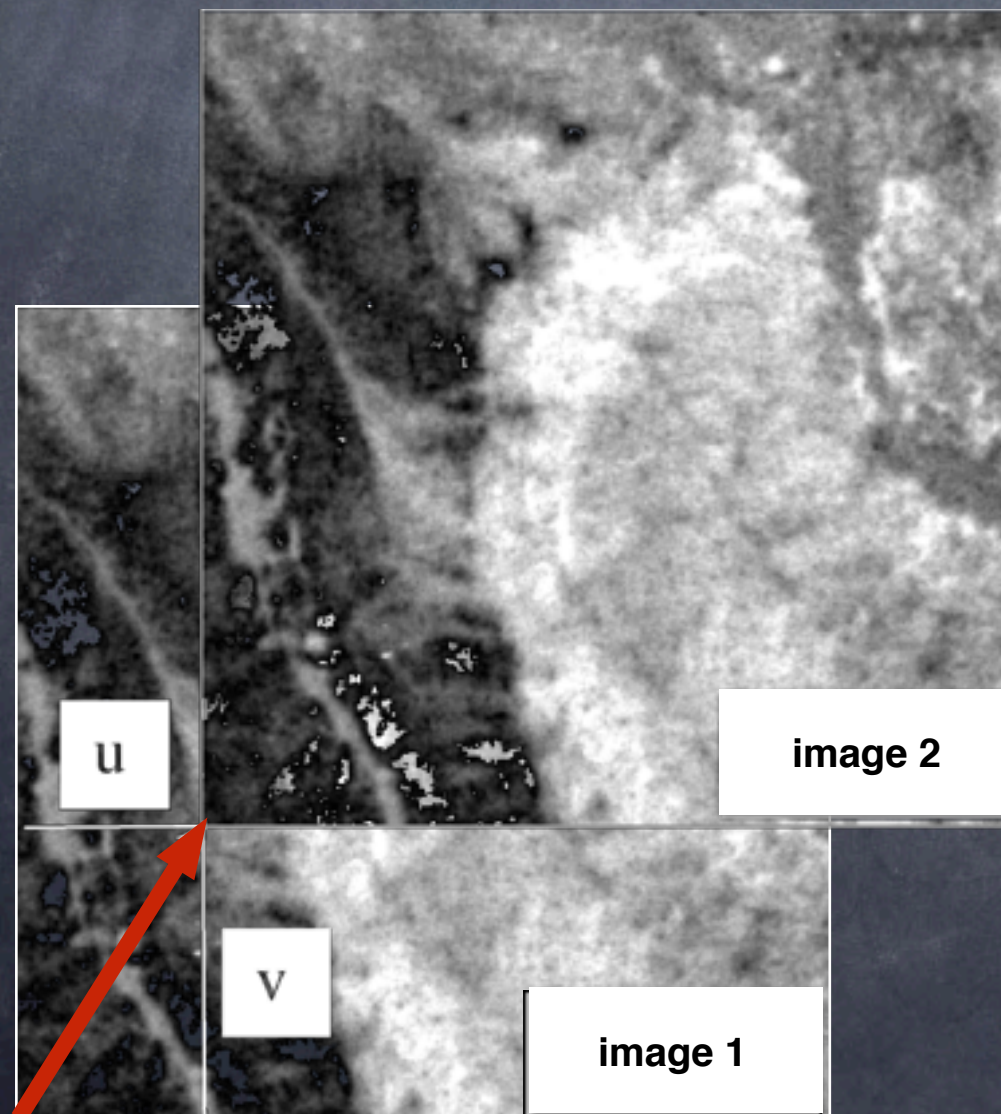


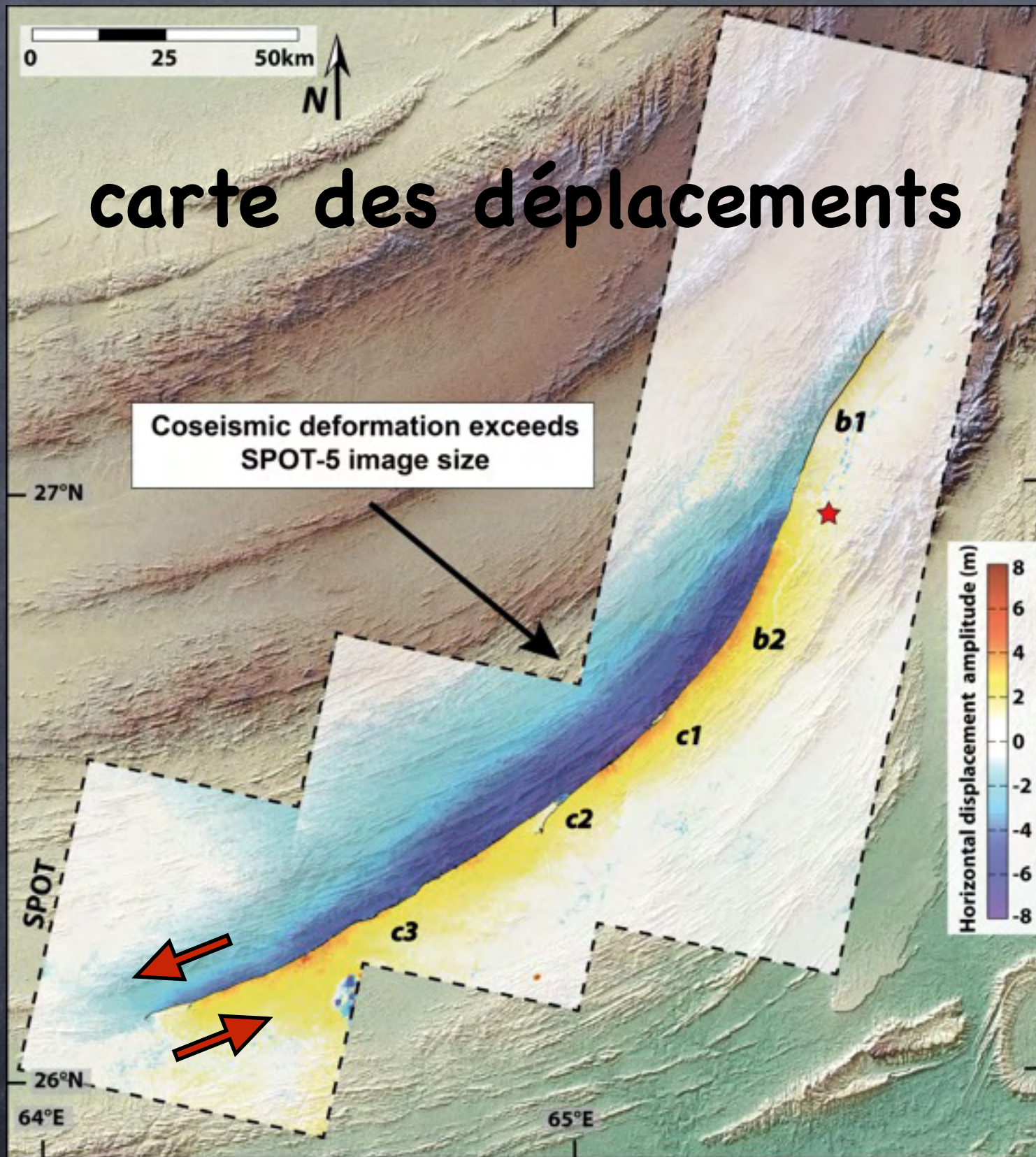
image d'archive
acquise avant le séisme

nouvelle image
acquise après le séisme



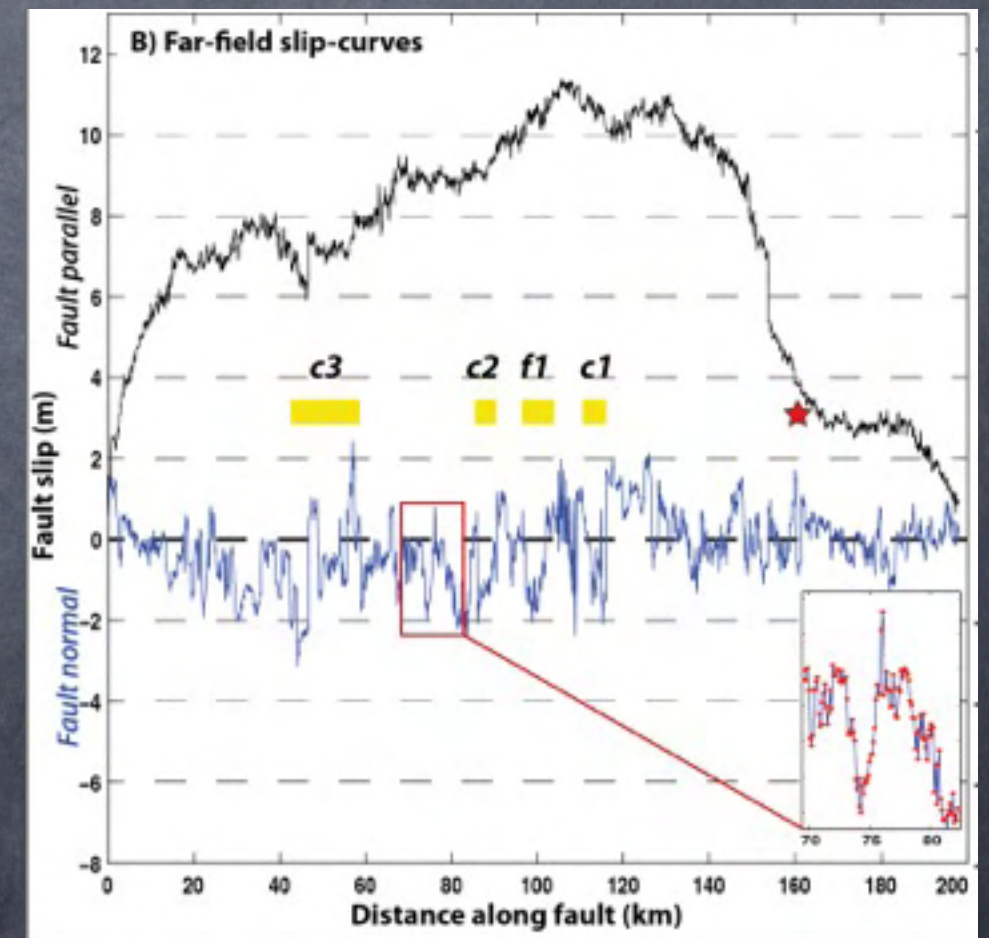
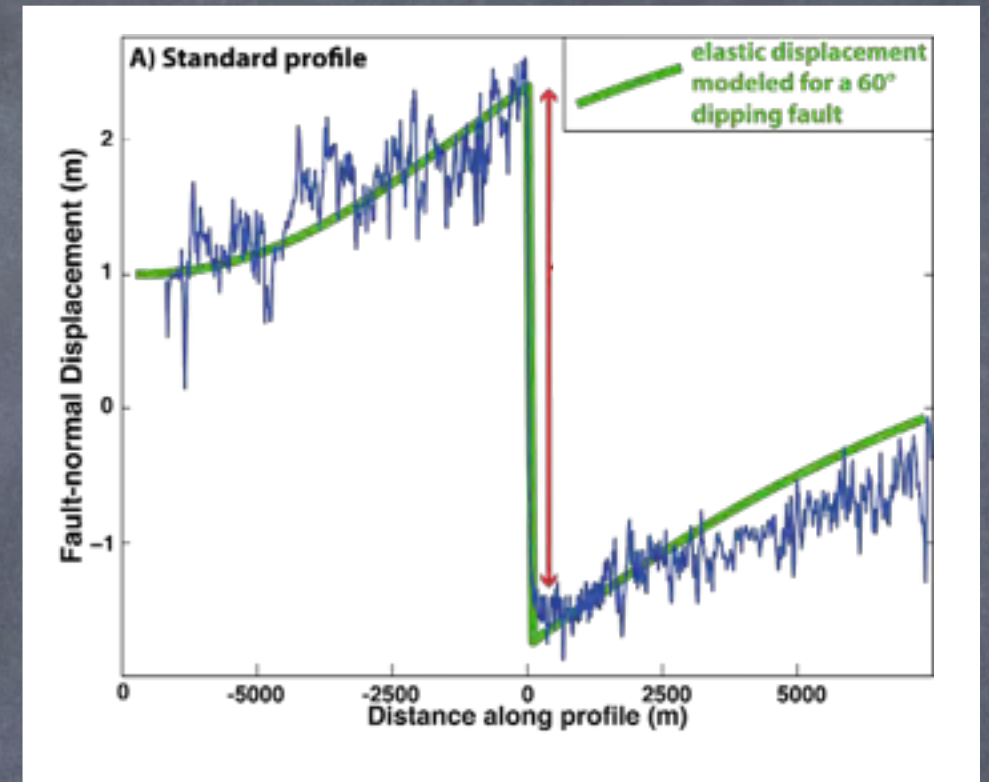
Mesure du déplacement
horizontal

carte des déplacements



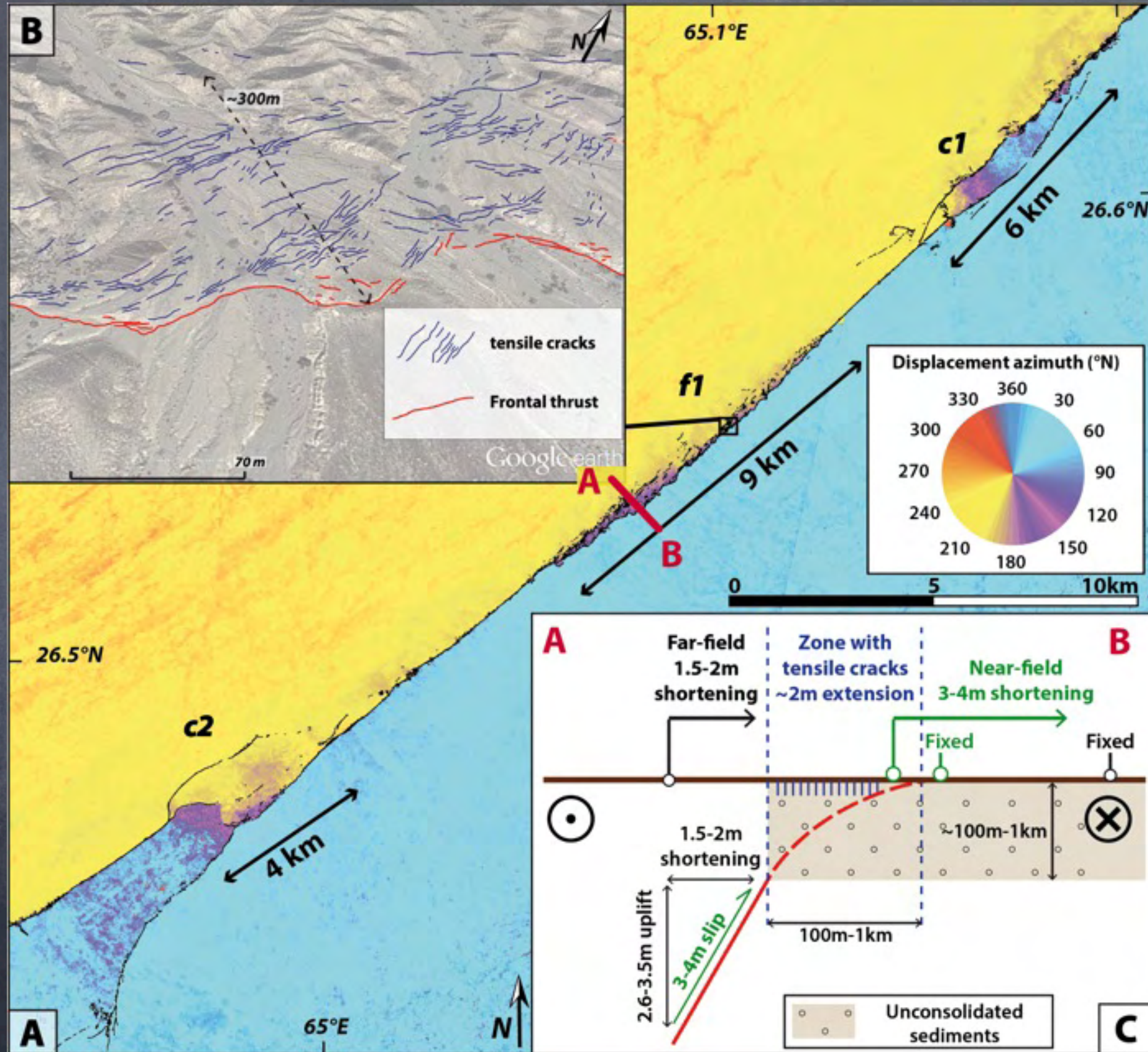
(Vallage et al., 2015)

pixel = 2.5 m



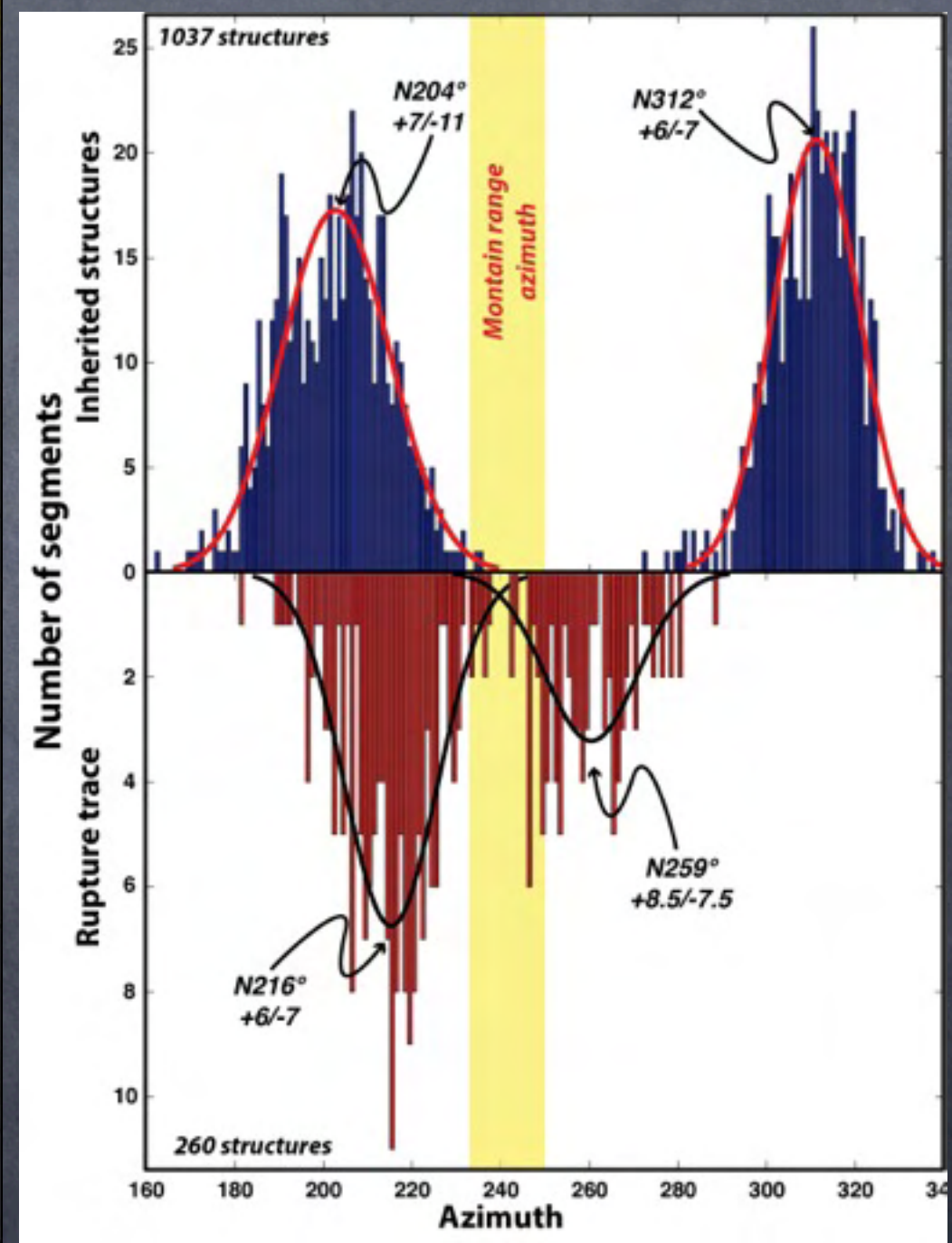
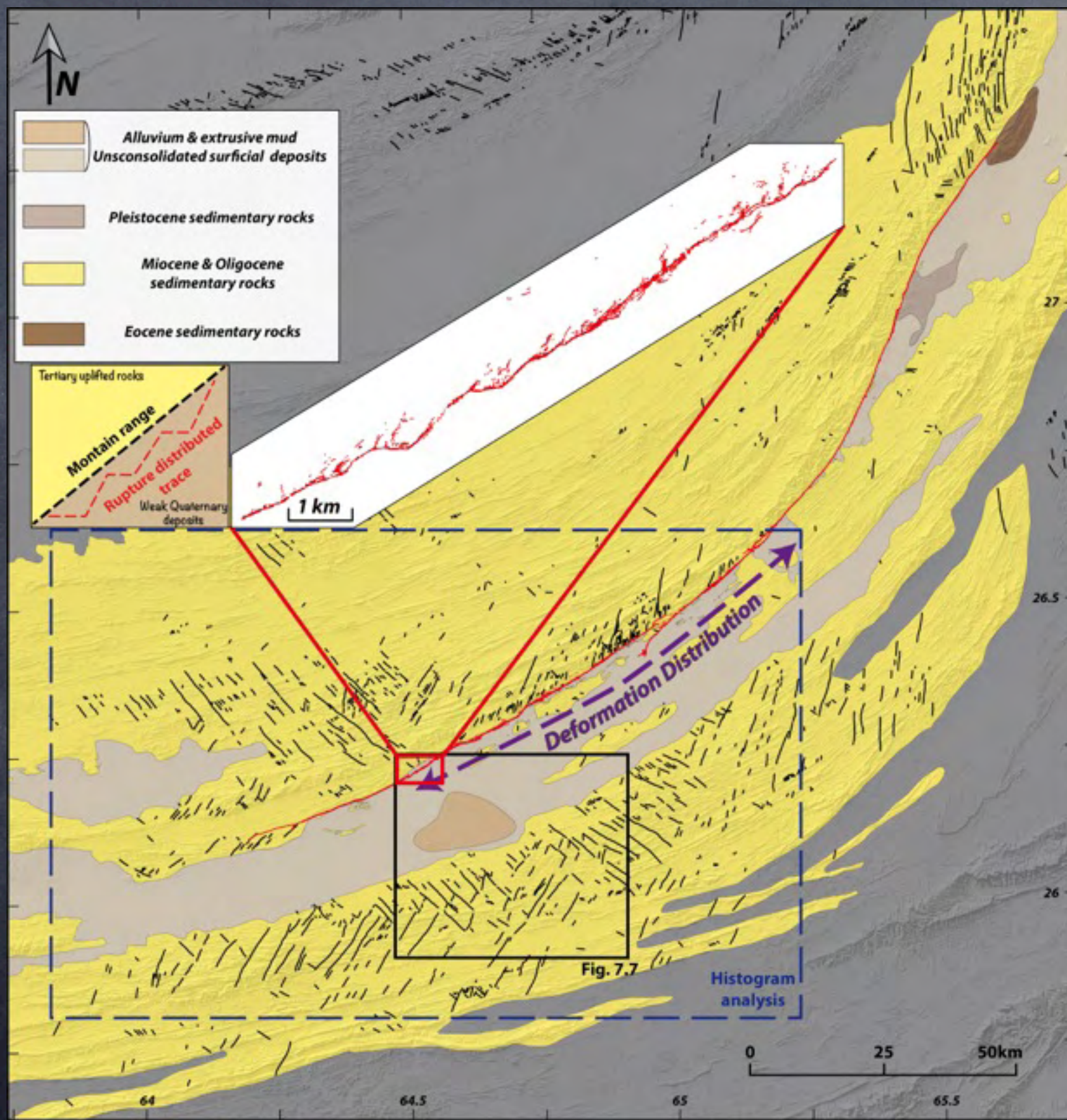
distribution du glissement

Regarder le detail de la rupture



(Vallage et al., 2015)

Mécanique de la rupture et géologie

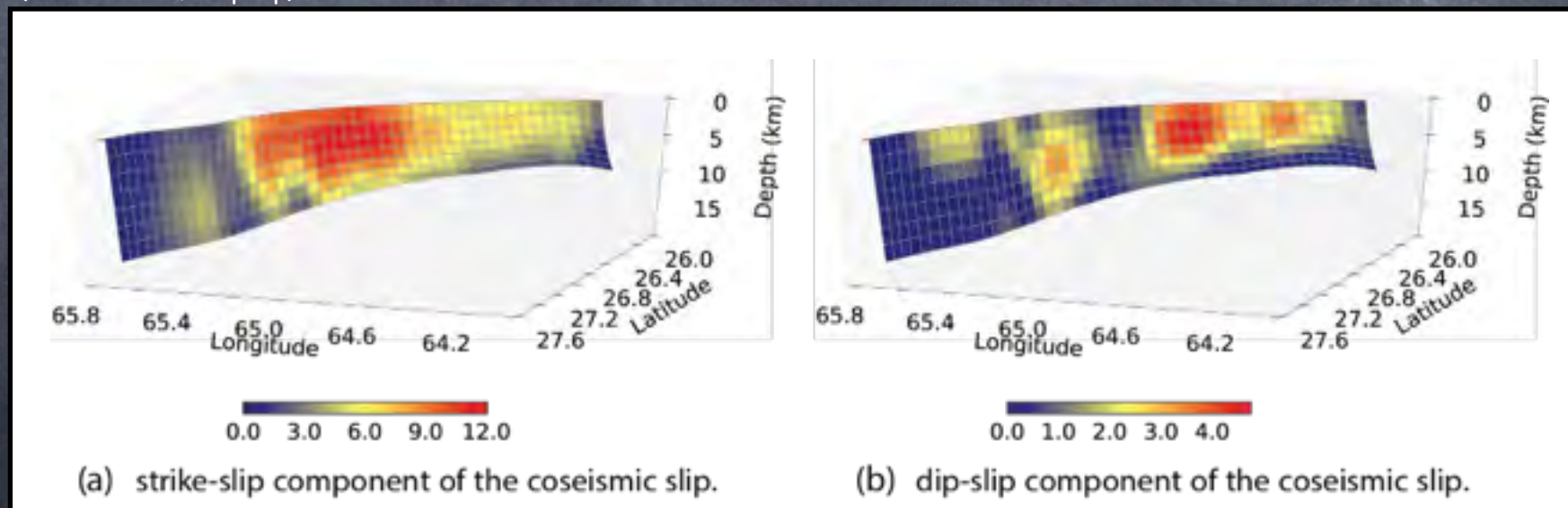


(Vallage et al. 2016)

L'imagerie spatiale est devenue un outil incontournable de l'étude des séismes

- détail de la déformation, géométrie
- mécanique de rupture sismique et géologie, des interactions pas si simples

(Lauer et al., in prep)



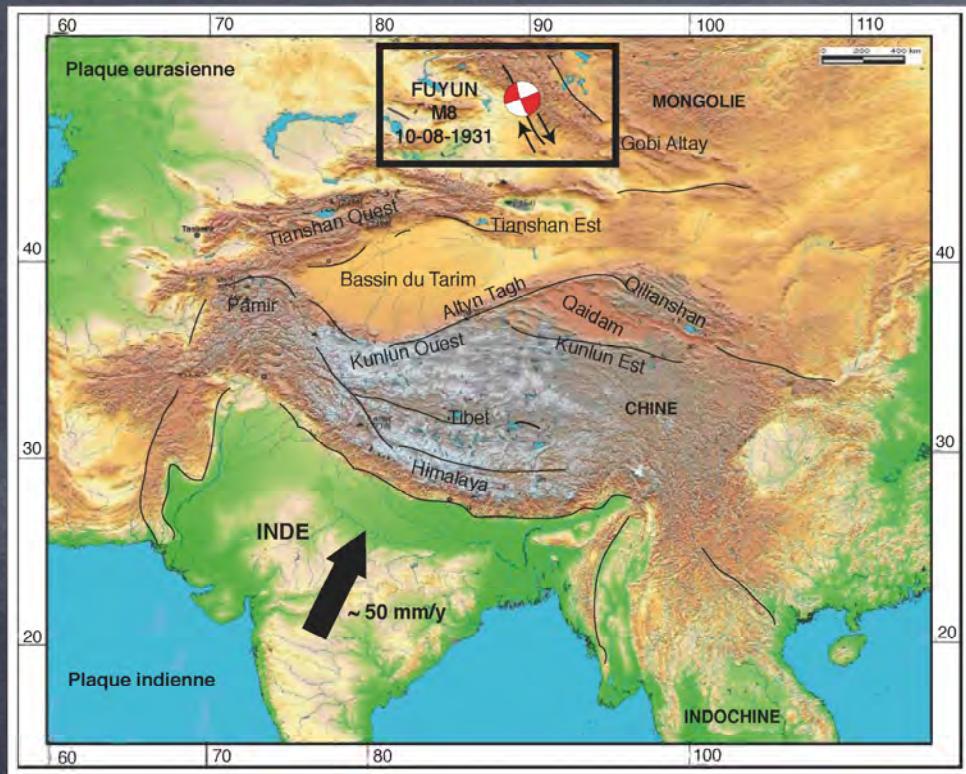
imagerie du glissement en profondeur

Pour pouvoir dire quelque chose sur le cycle sismique,
tout savoir sur le dernier séisme ne suffit pas



Fouiller le passé pour retrouver les
traces des séismes anciens

L'imagerie THR pour chasser les séismes anciens



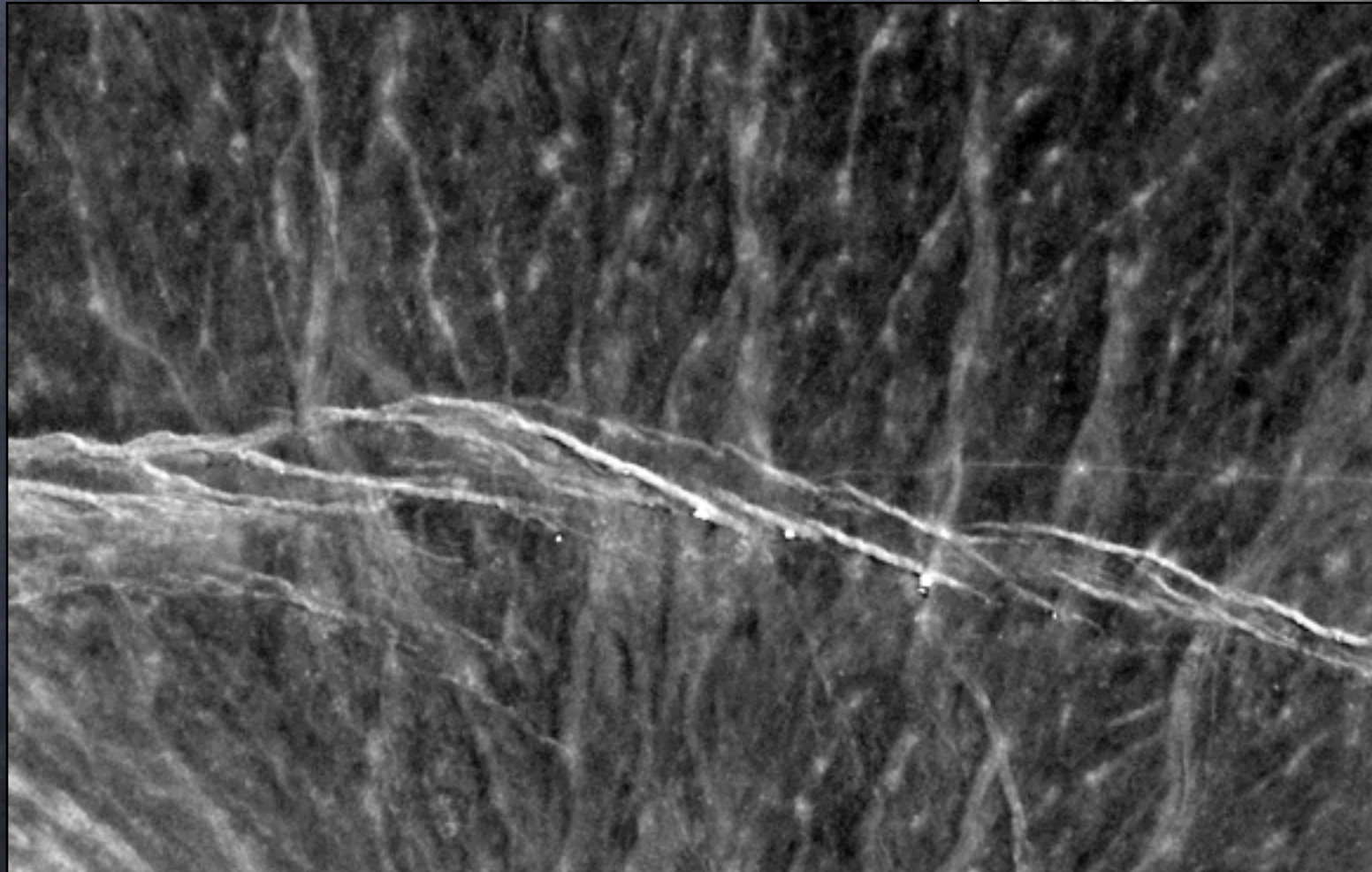
Le séisme de Fuyun, M8, 1931
retrouvé 85 ans après les faits



**une rupture de surface
bien conservée**



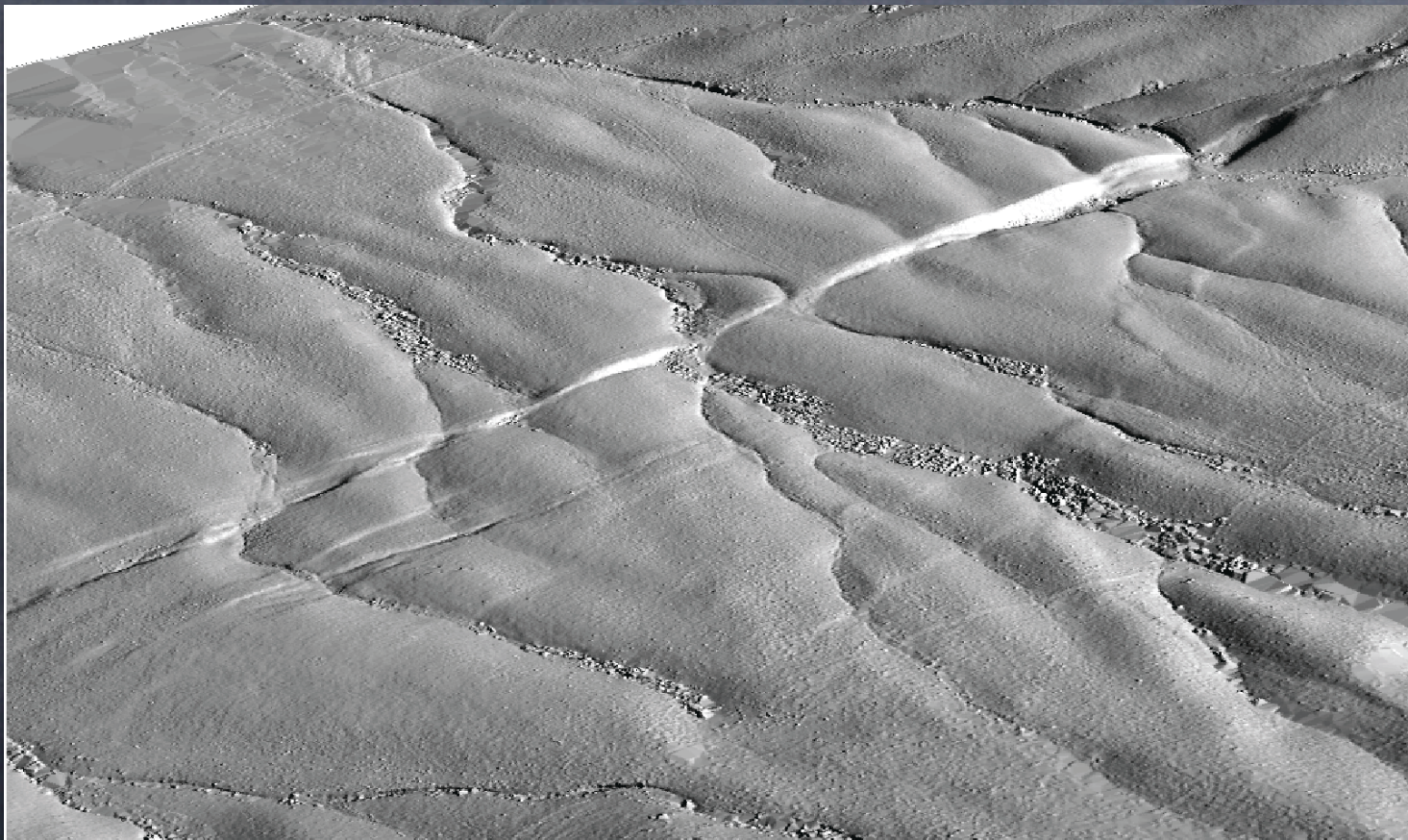
2001
Séisme du Kunlun



1931
Séisme de Fuyun

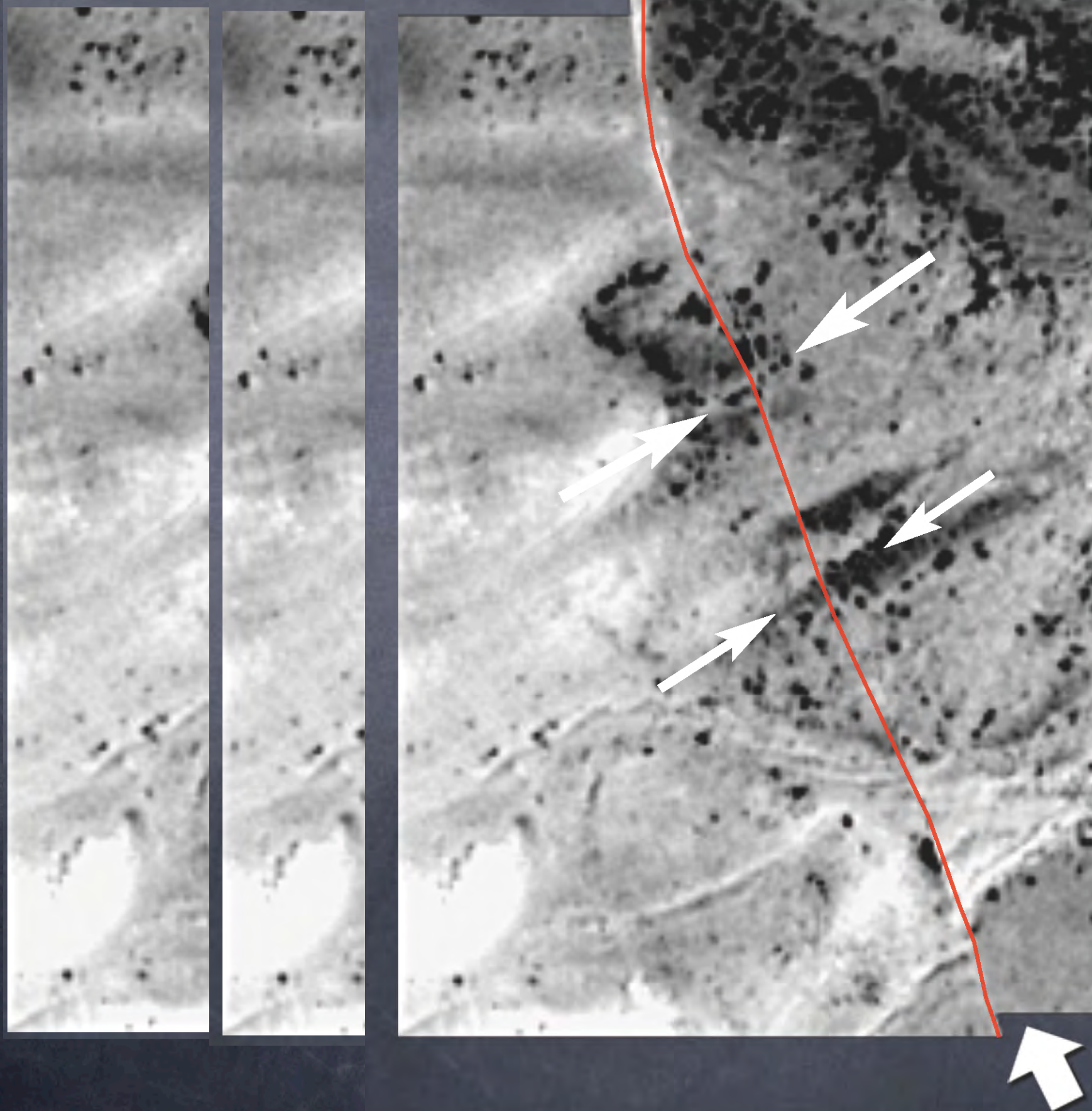
Les ruptures anciennes sont visibles de l'espace

L'imagerie THR complétée par la topographie THR



Lidar sol
(Laser Detection And Ranging)

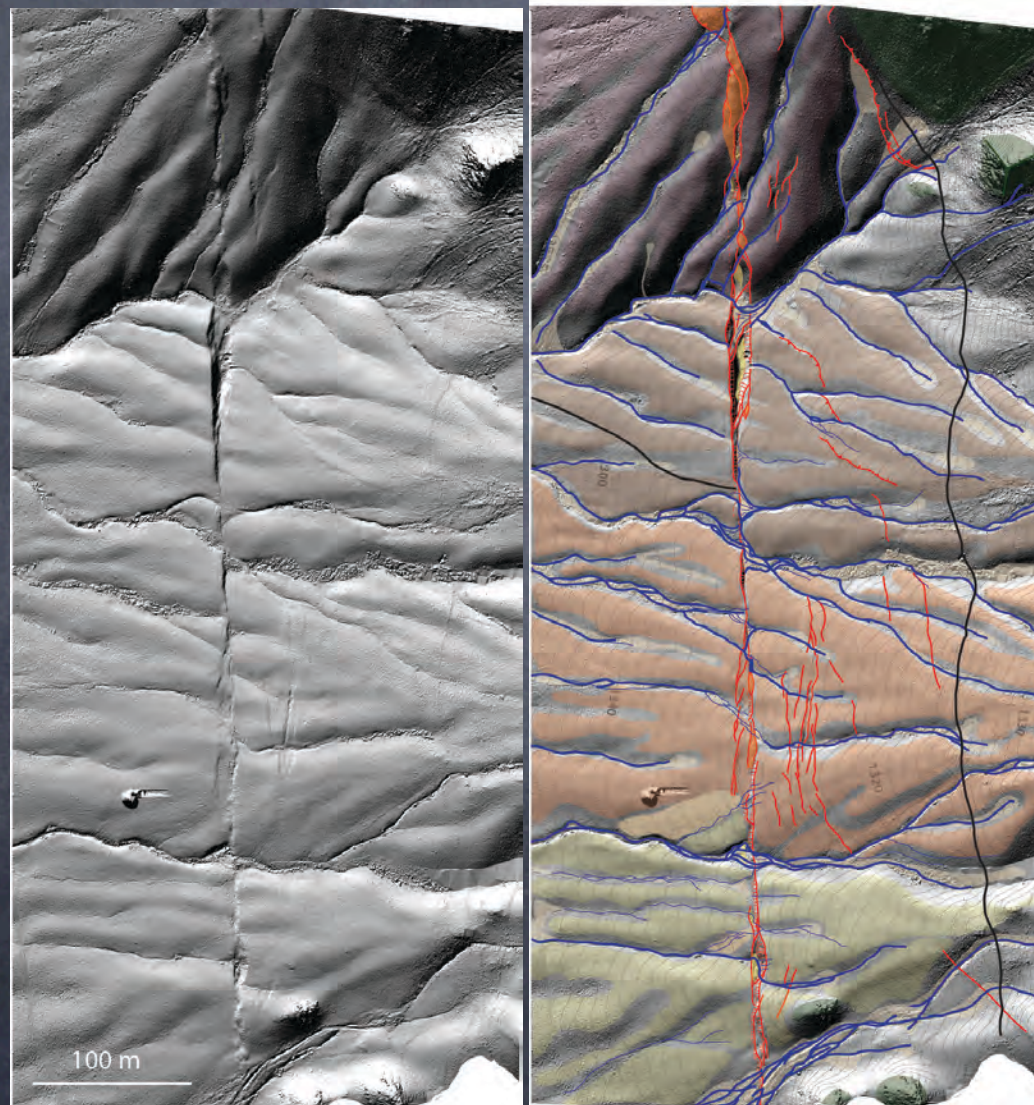
Exemple de mesure



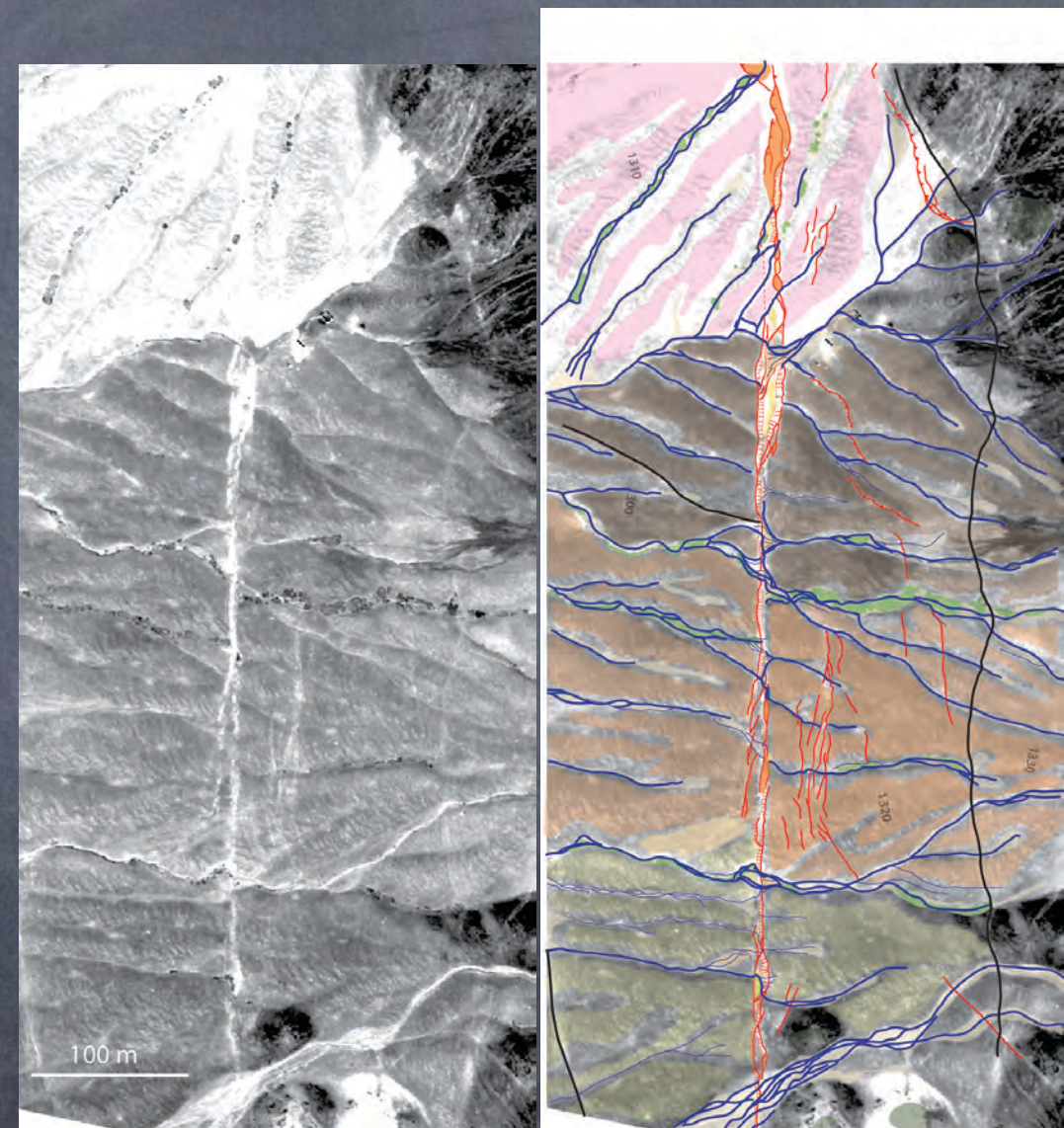
**Lateral offset:
 6.5 ± 1.5 m**

Combiner l'imagerie et la topographie pour mesurer les décalages dans le paysage

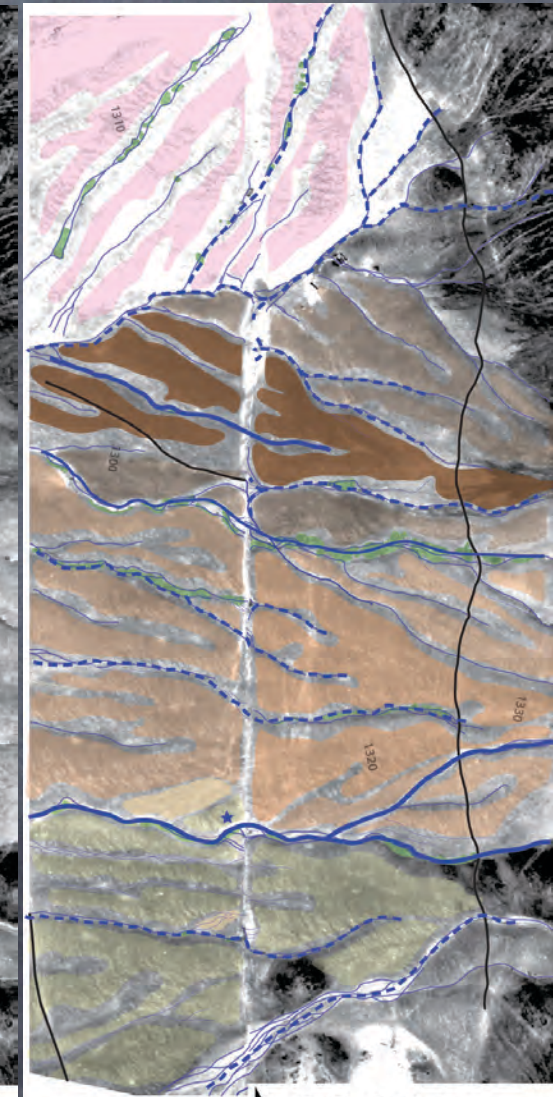
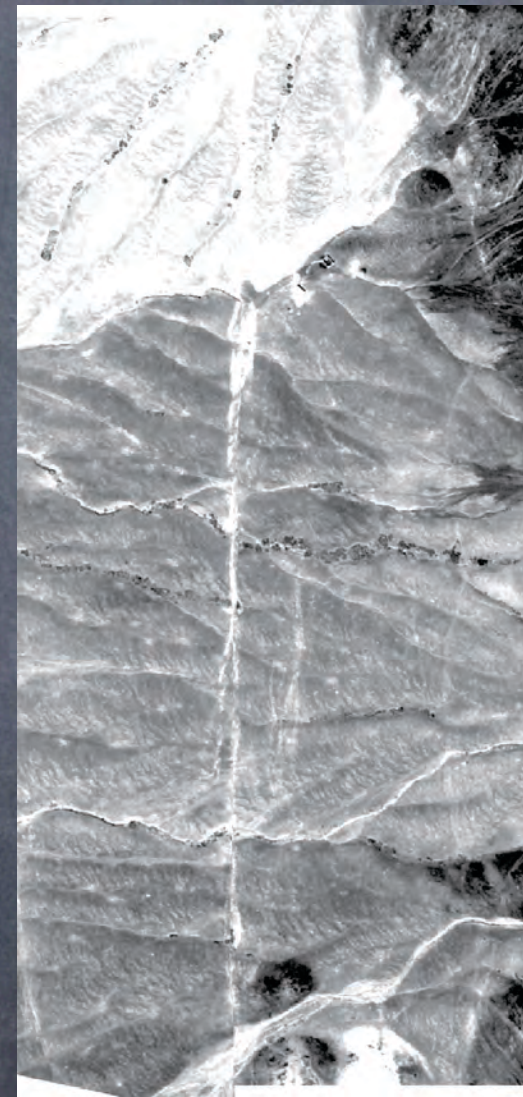
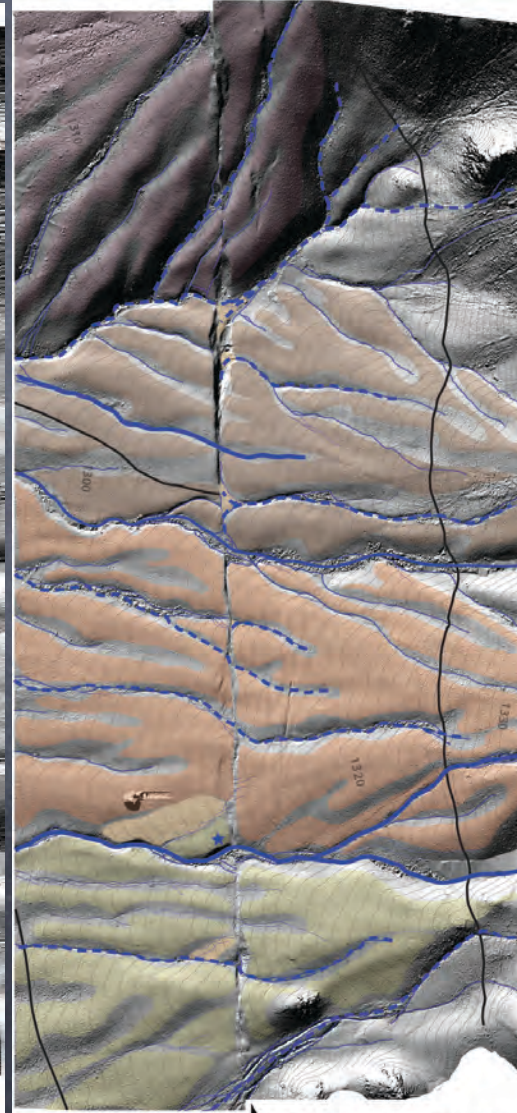
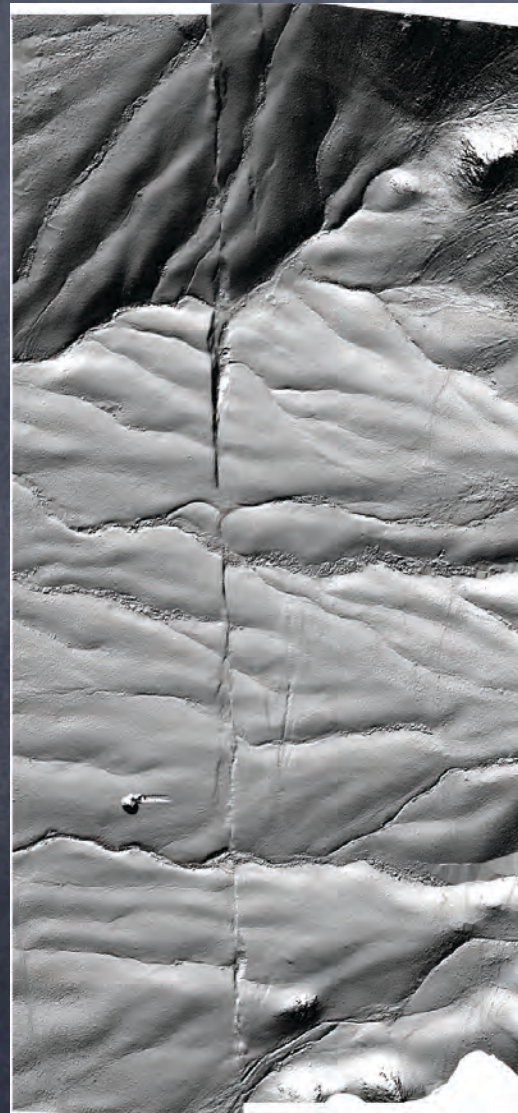
topo (10cm)



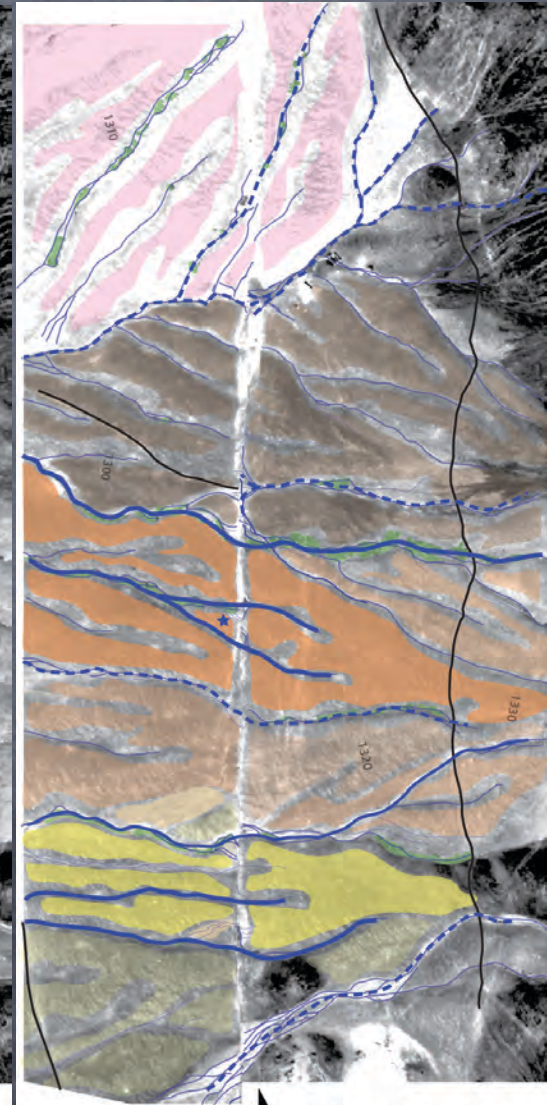
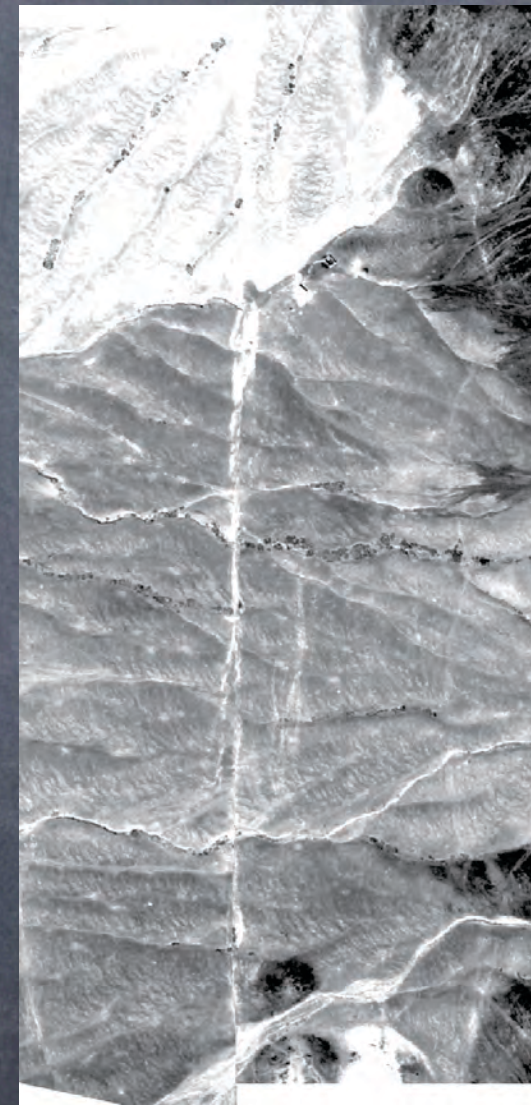
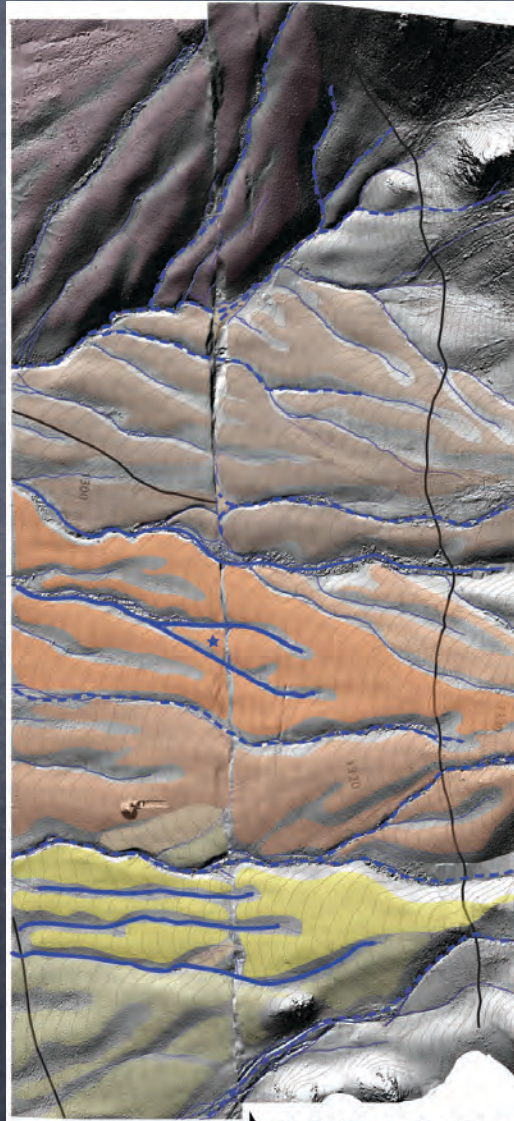
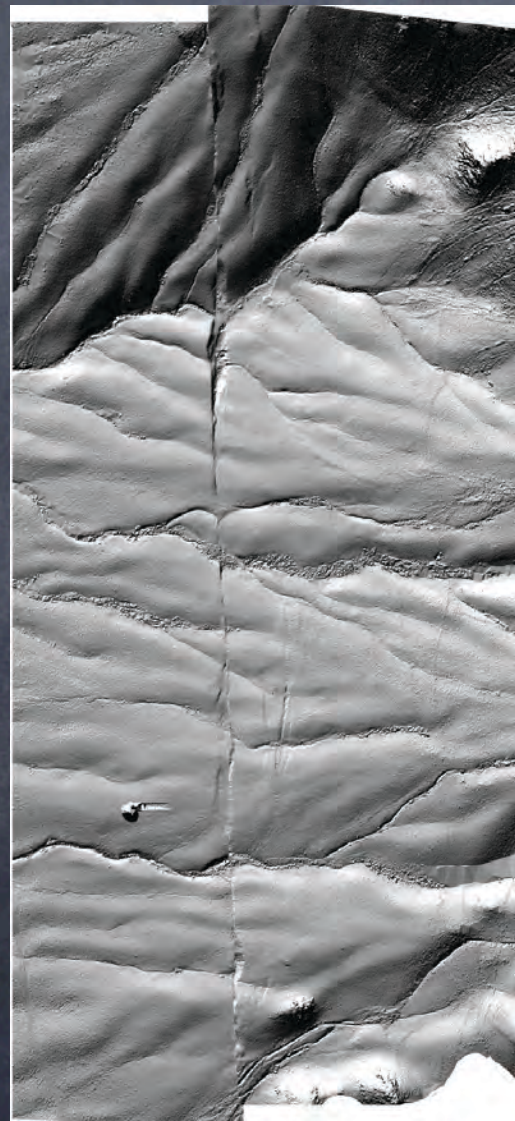
imagerie (70cm)



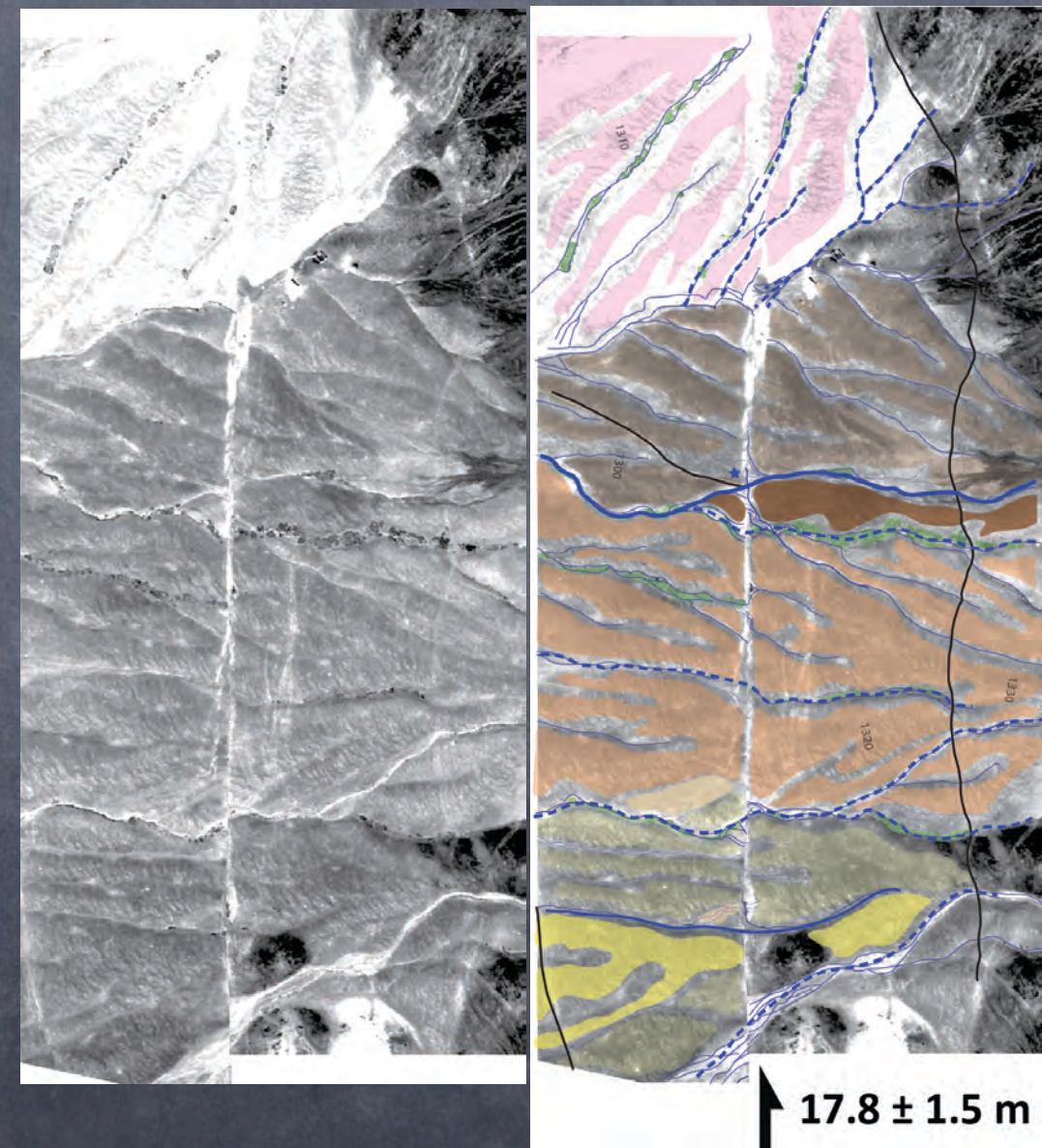
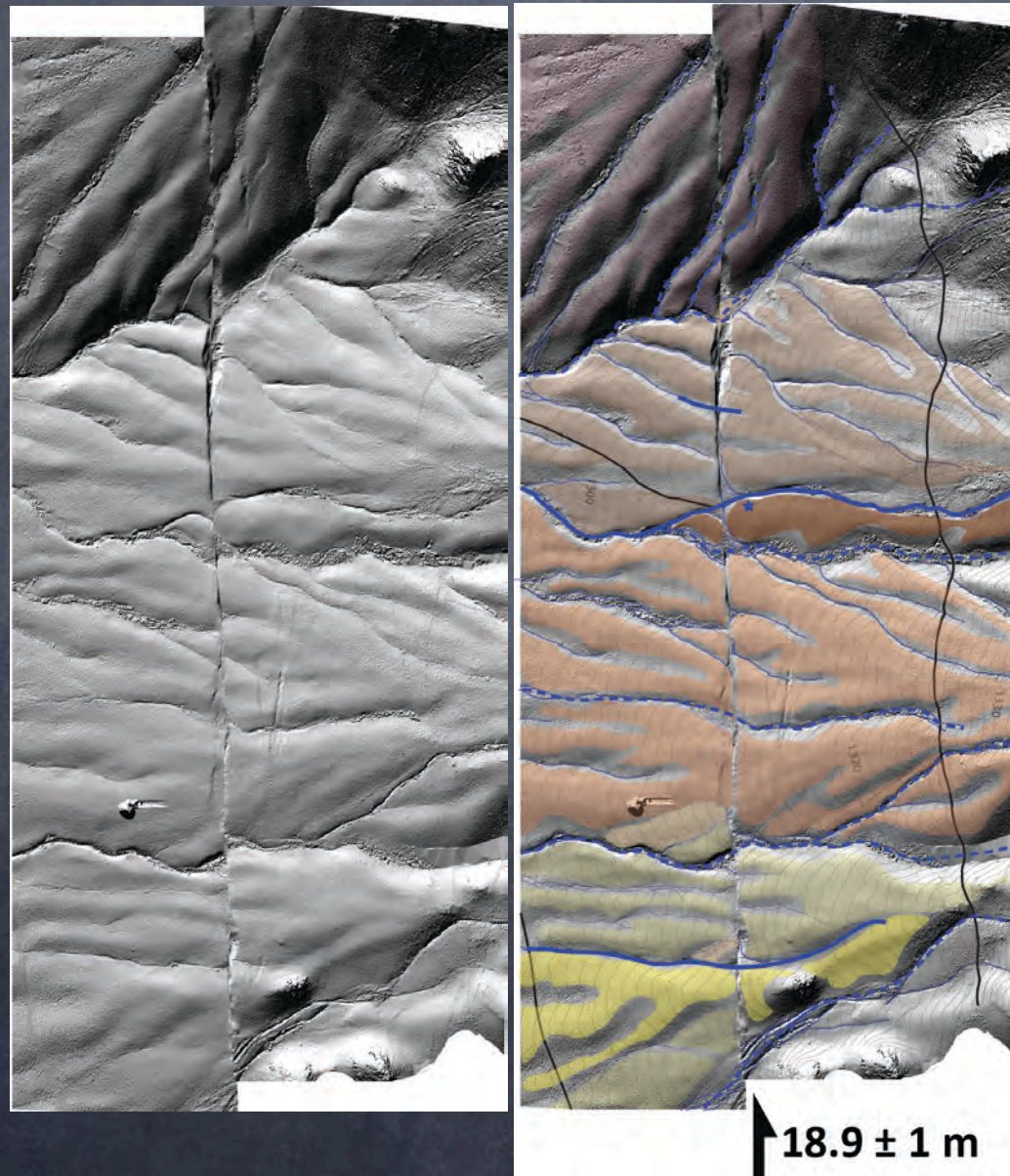
restauration du plus petit décalage => le dernier séisme > 1931



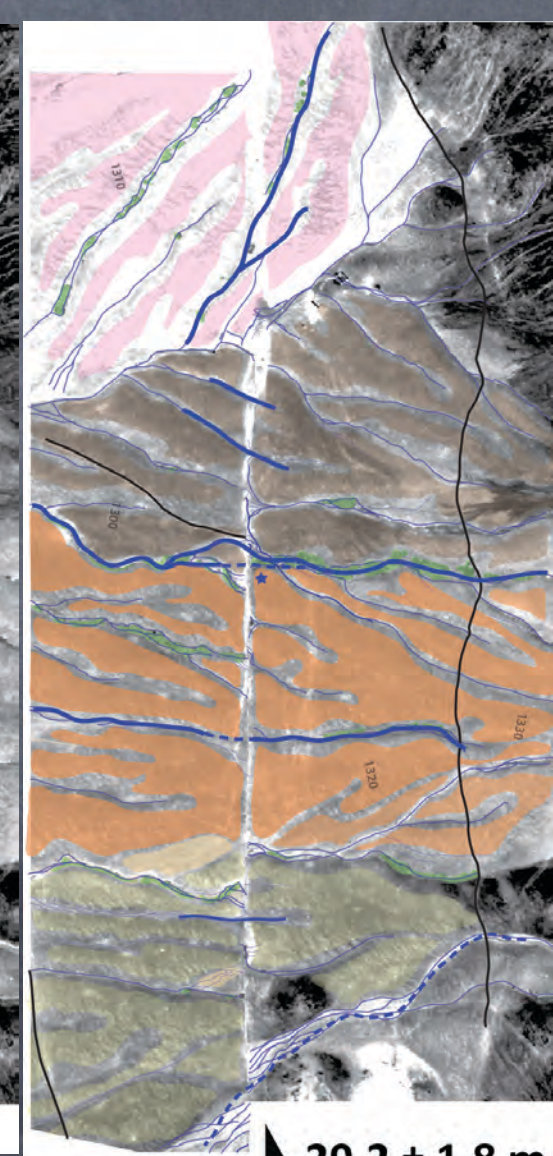
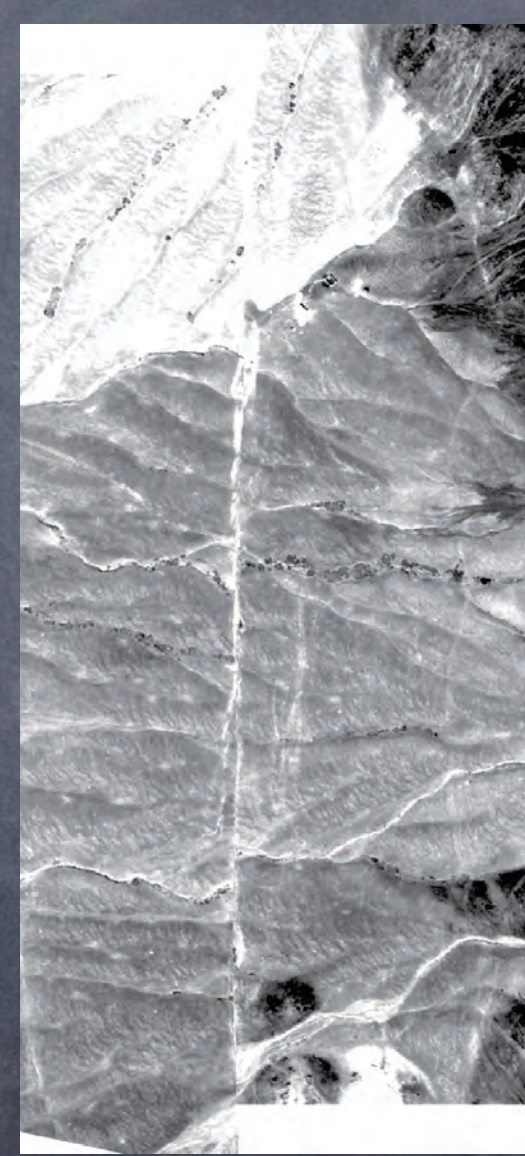
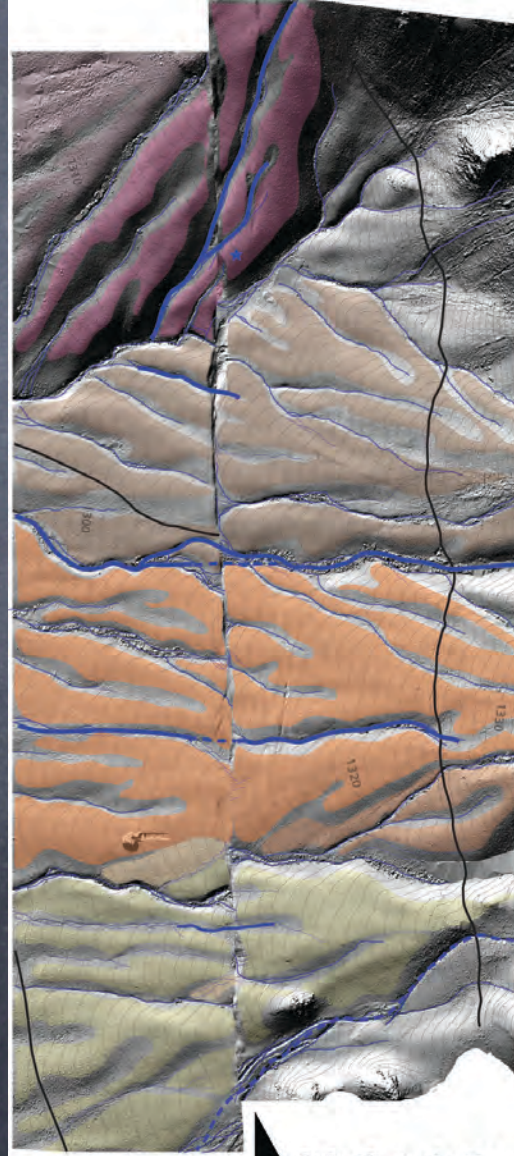
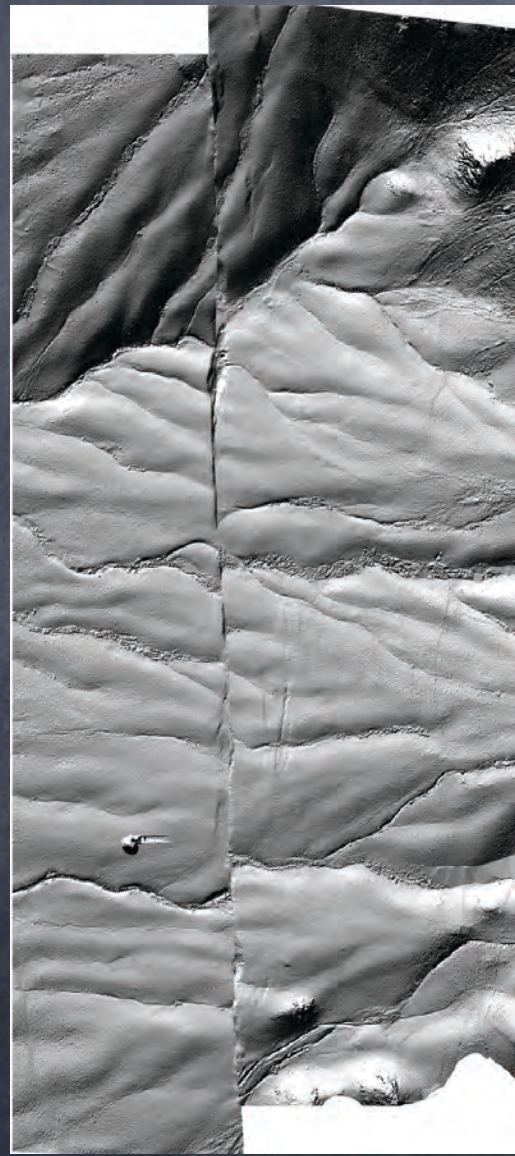
L'avant-dernier séisme



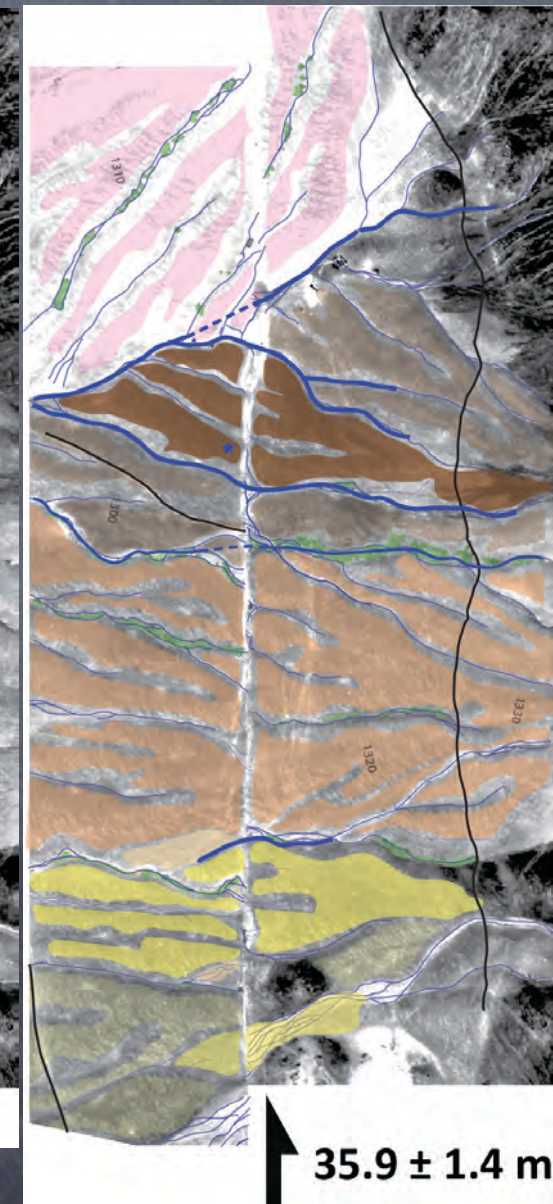
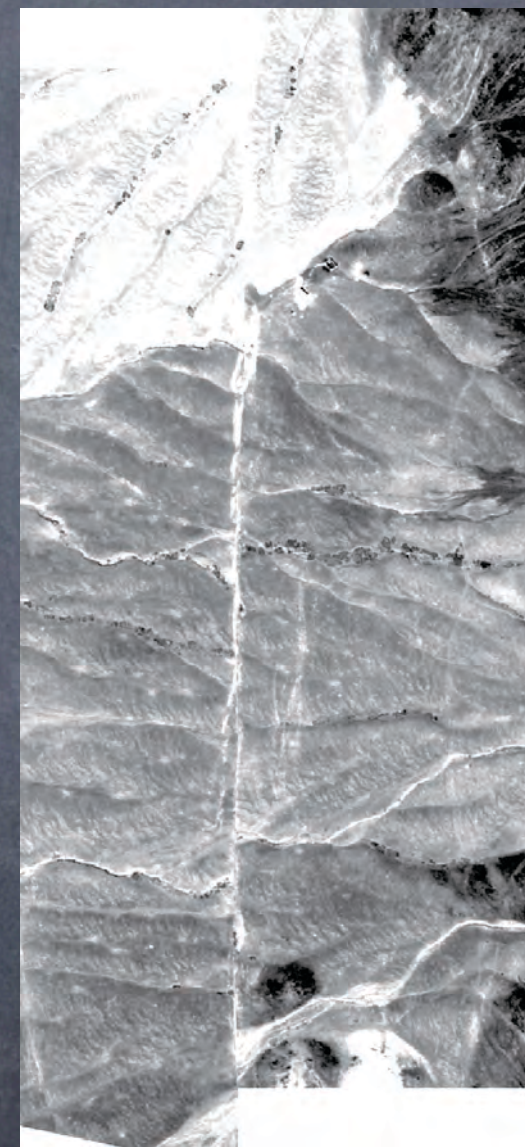
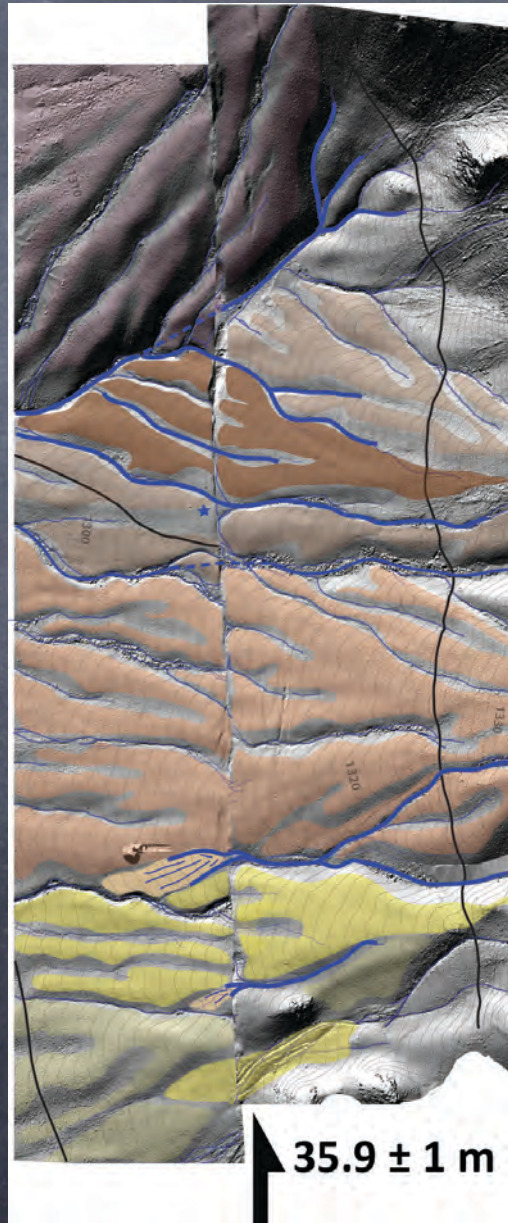
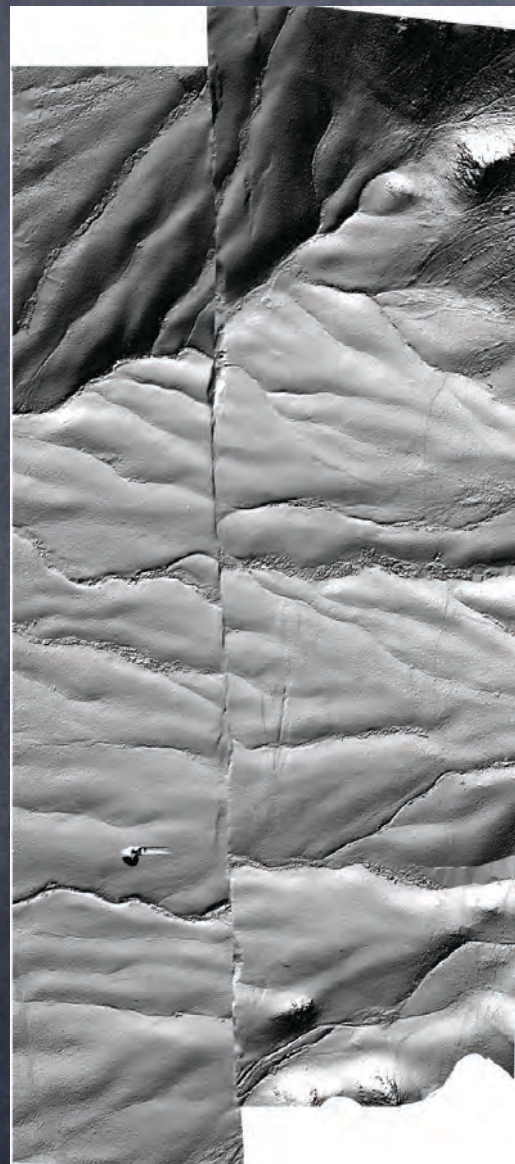
L'avant avant dernier séisme

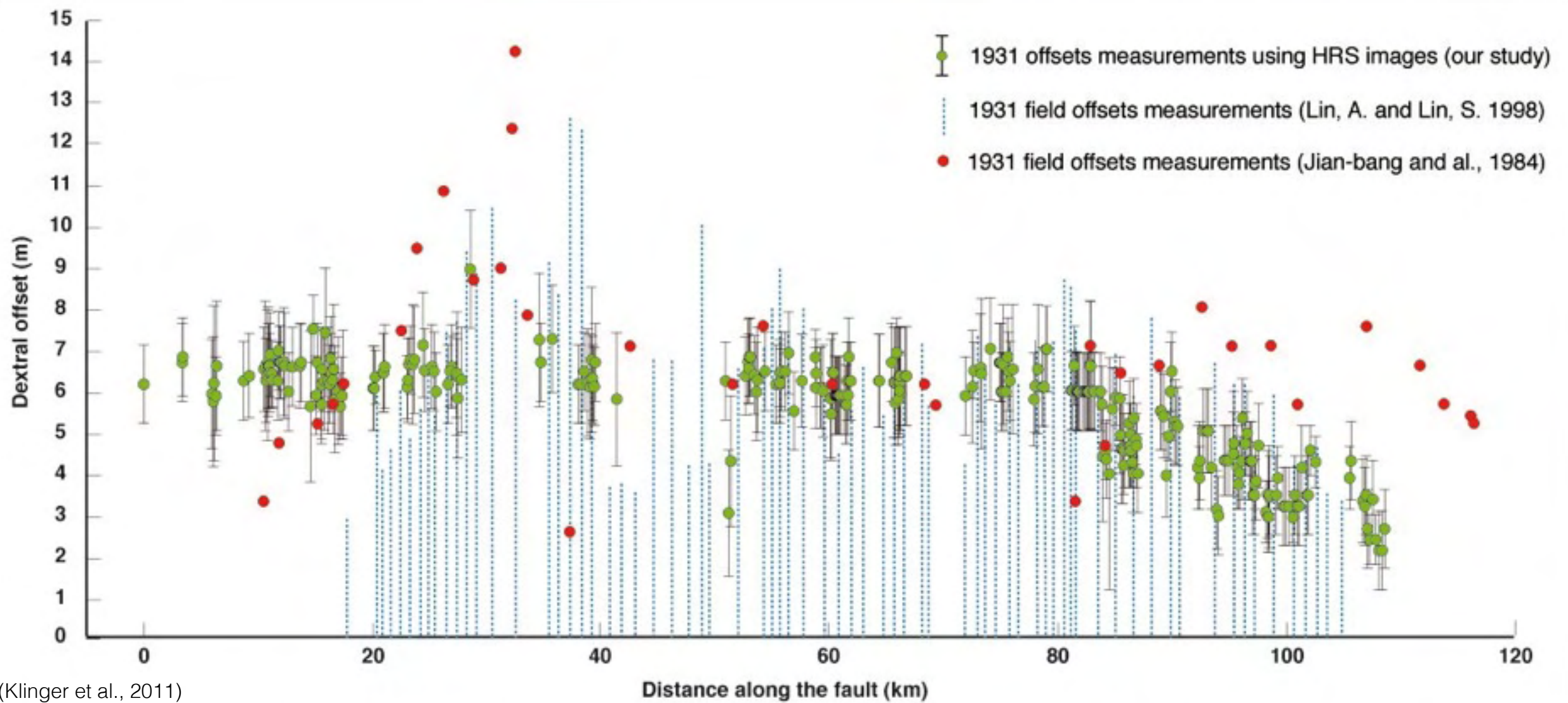


L'avant avant avant dernier séisme



L'avant ... avant dernier séisme





=> distribution de glissement
 pour le séisme de Fuyun, 1931

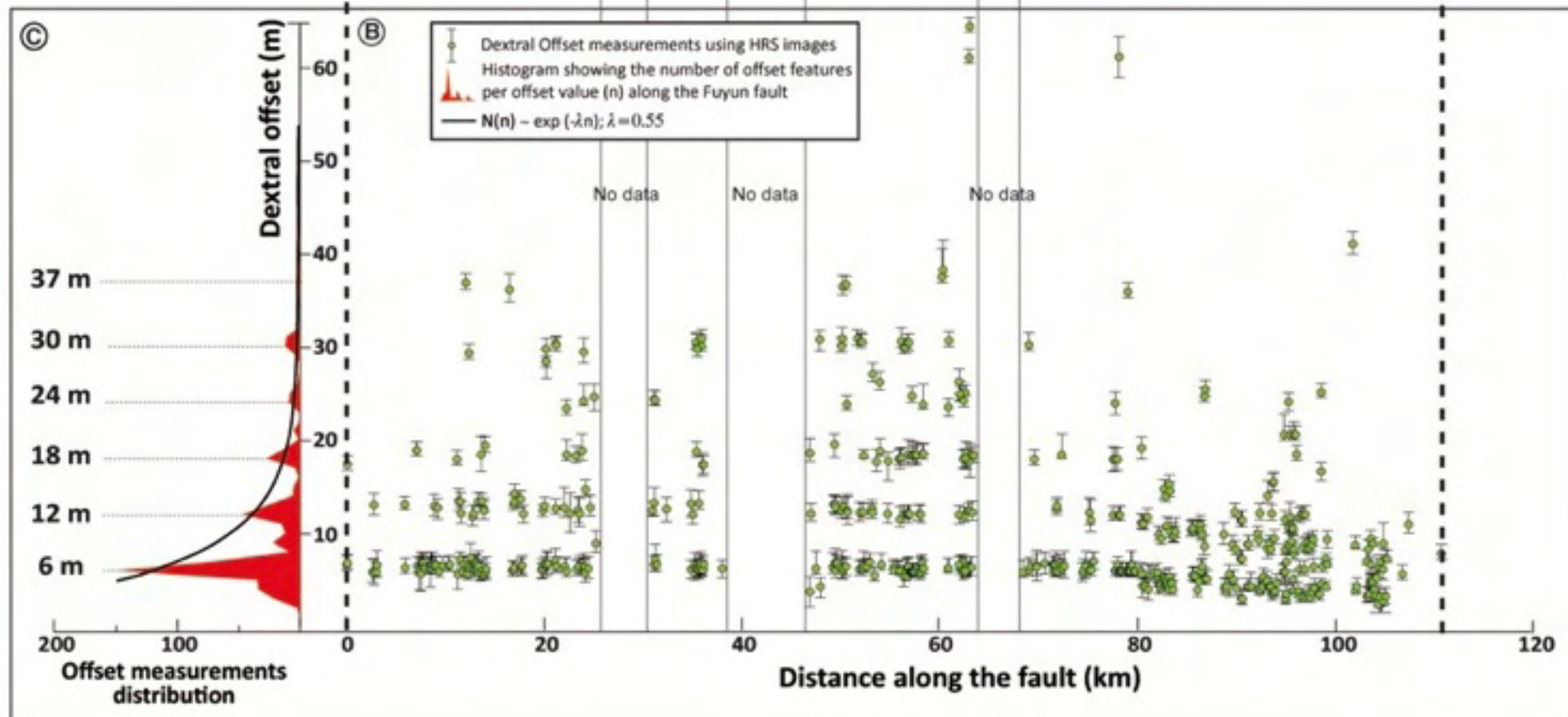
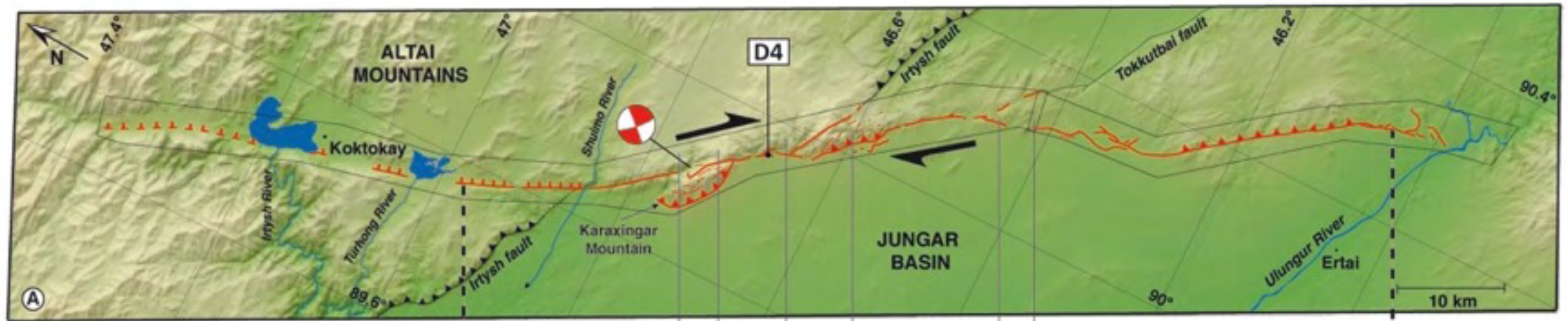


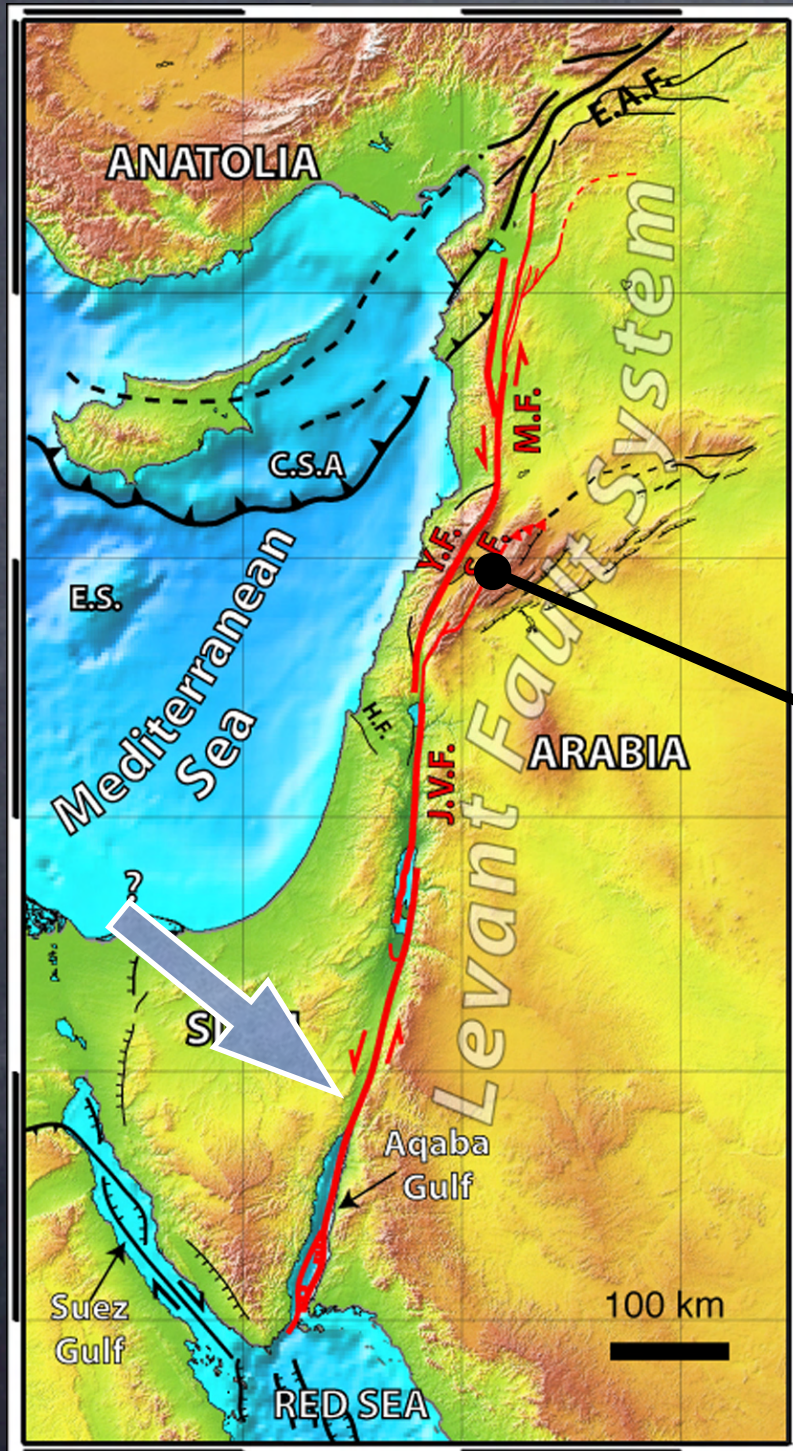
Fig. 1
Klinger et al.

(Klinger et al., 2011)

**glissement similaire pour plusieurs séismes
 => une contrainte forte pour les modèles de cycle
 sismique**

Et l'aspect temporel?

Quel temps de retour pour les séismes?



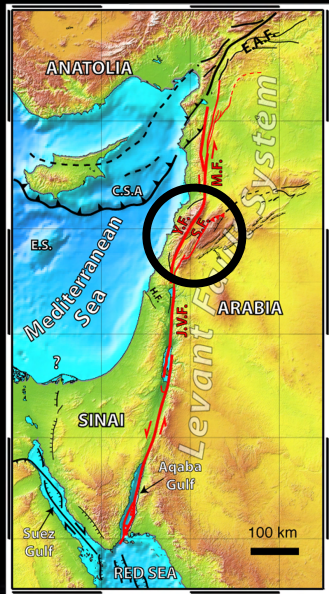
trouver un piège à séismes

préserver la trace des séismes anciens
pouvoir dater les séismes anciens

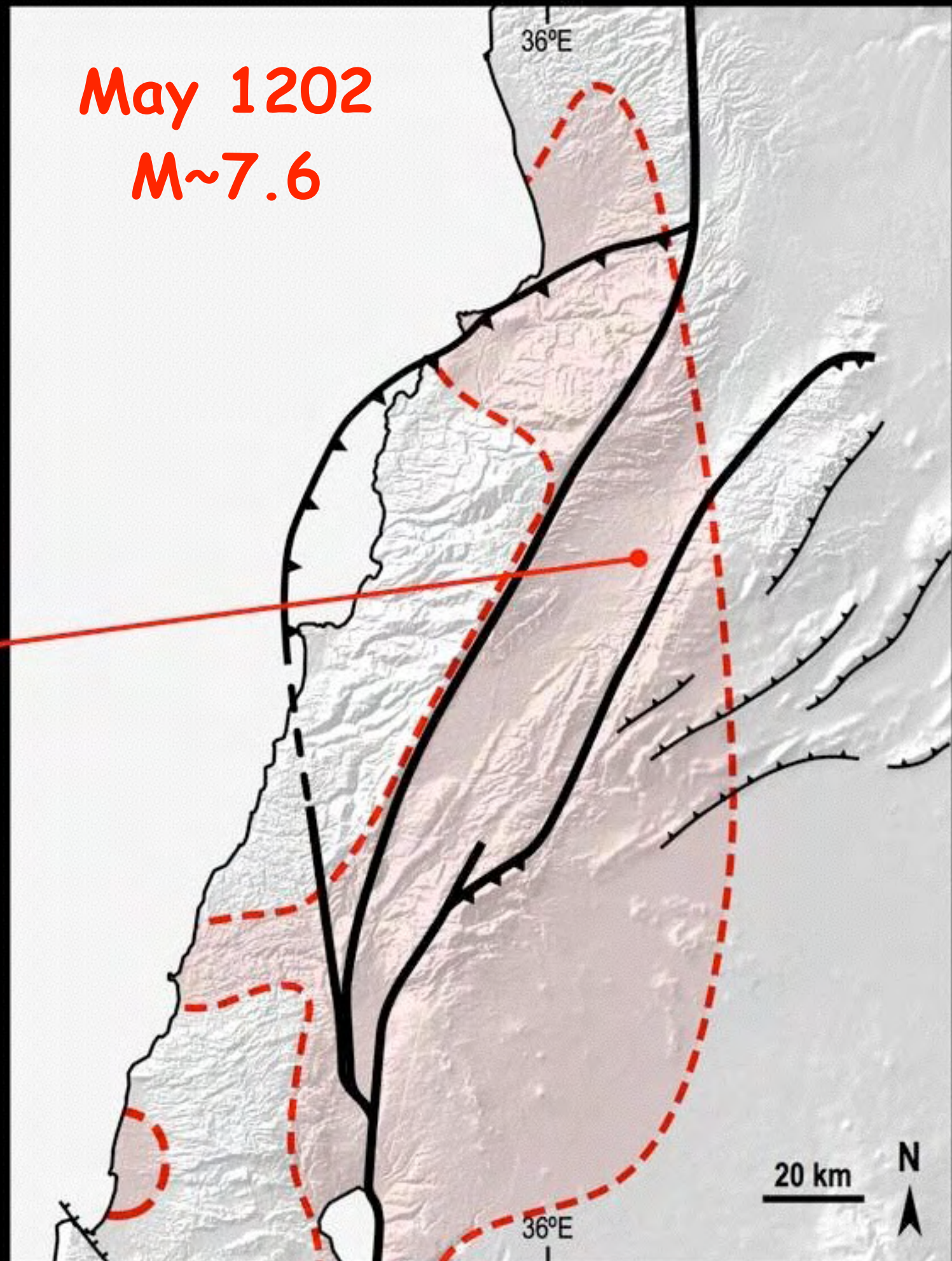
bonus: une histoire longue



31 colonnes
s'effondrent à
Baalbek lors du
séisme $M > 7.6$
en 1202



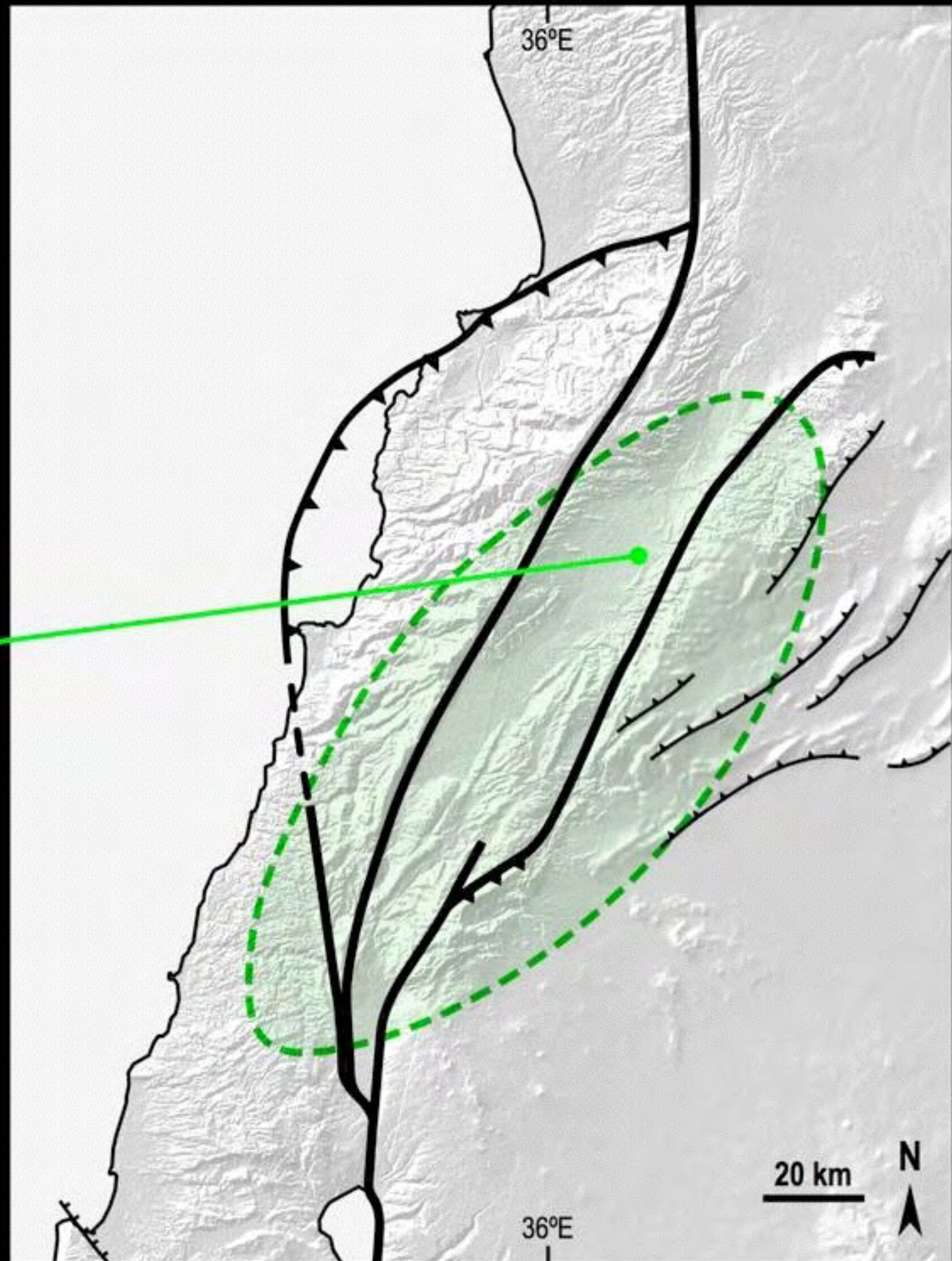
Jupiter Temple in Baalbek :
31/40 columns collapsed



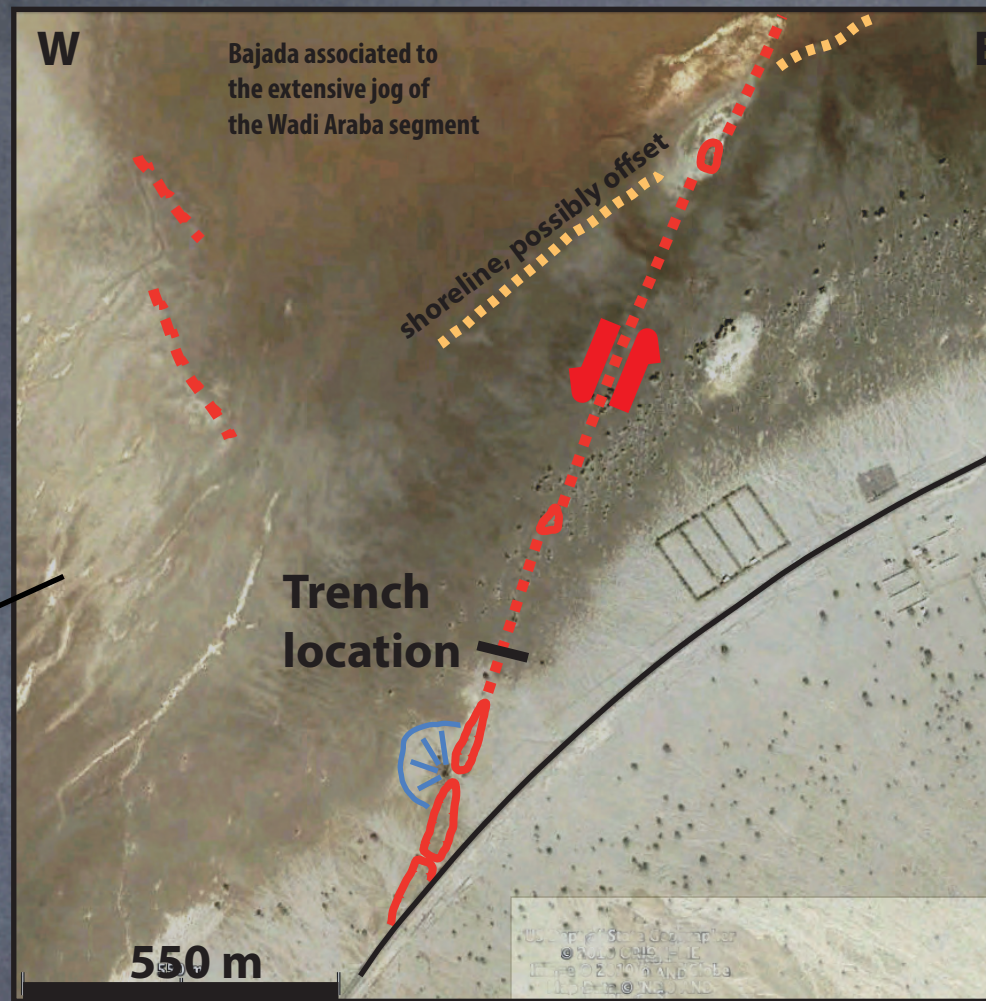
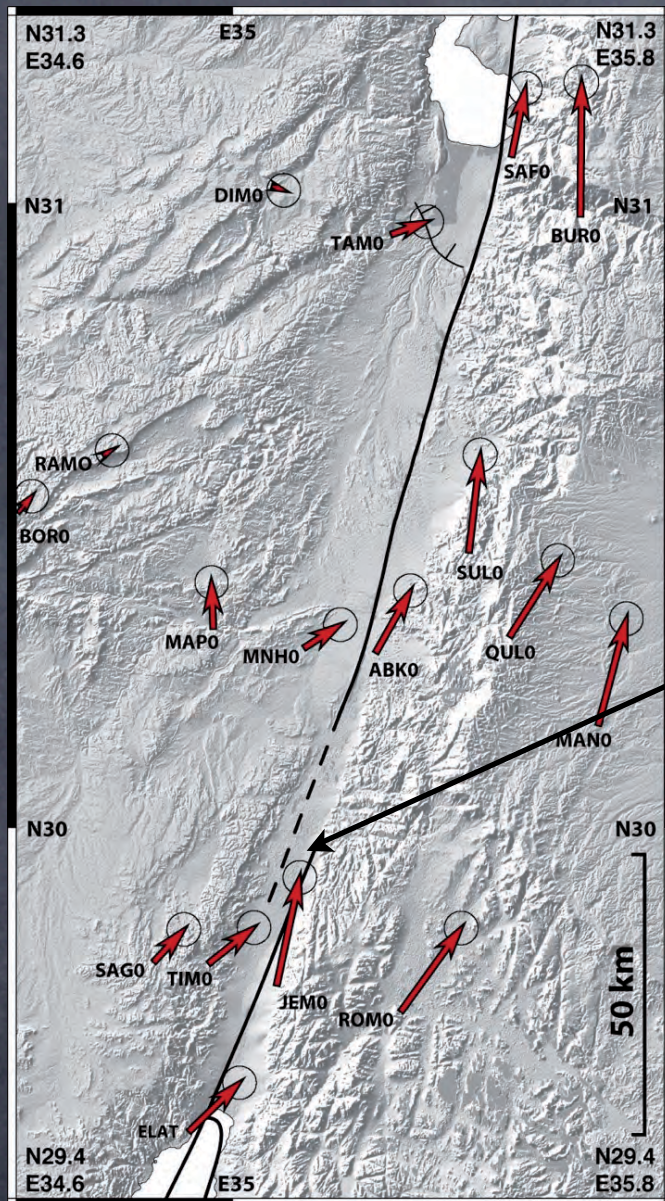
Novembre 1759
M~7.4



Bacchus Temple in Baalbek



Serie temporelle le long de la faille du Levant

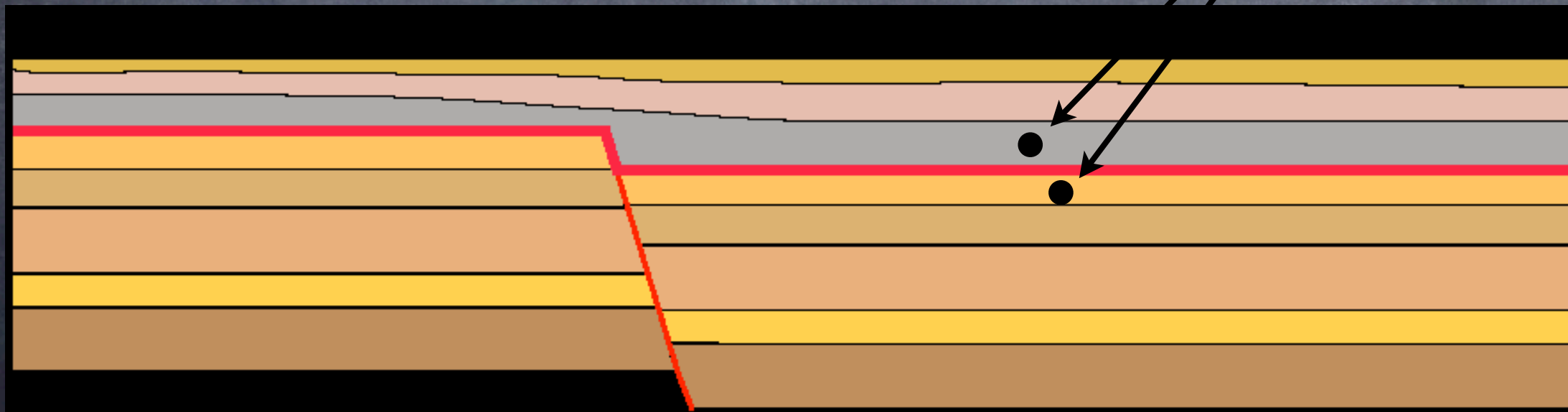


le fond d'une bajada asséchée

basic de paléosismologie



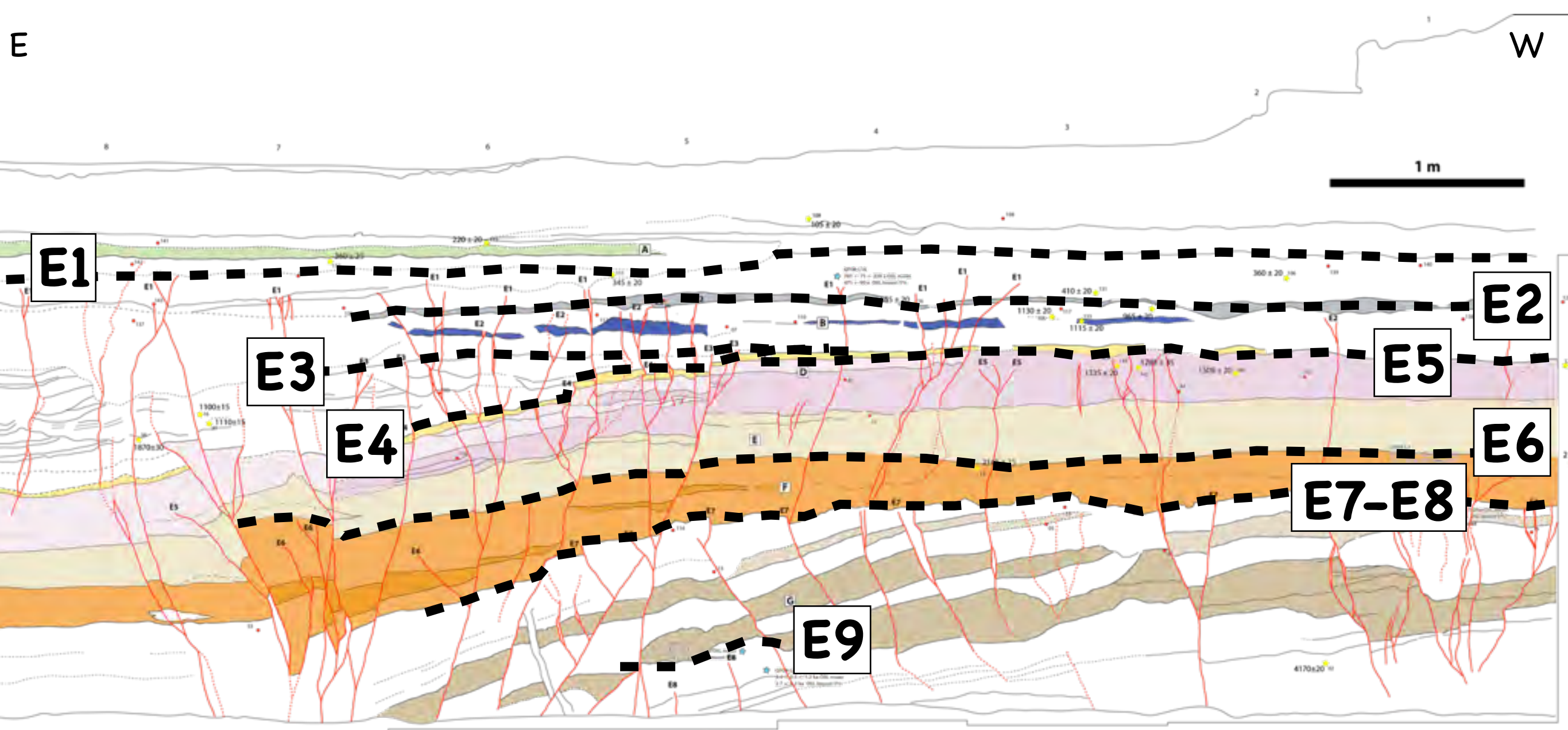
dating



Event
Horizon

Trench view





E1

E2

E3

E5

E4

E6

E7-E8

E9

1 m

E

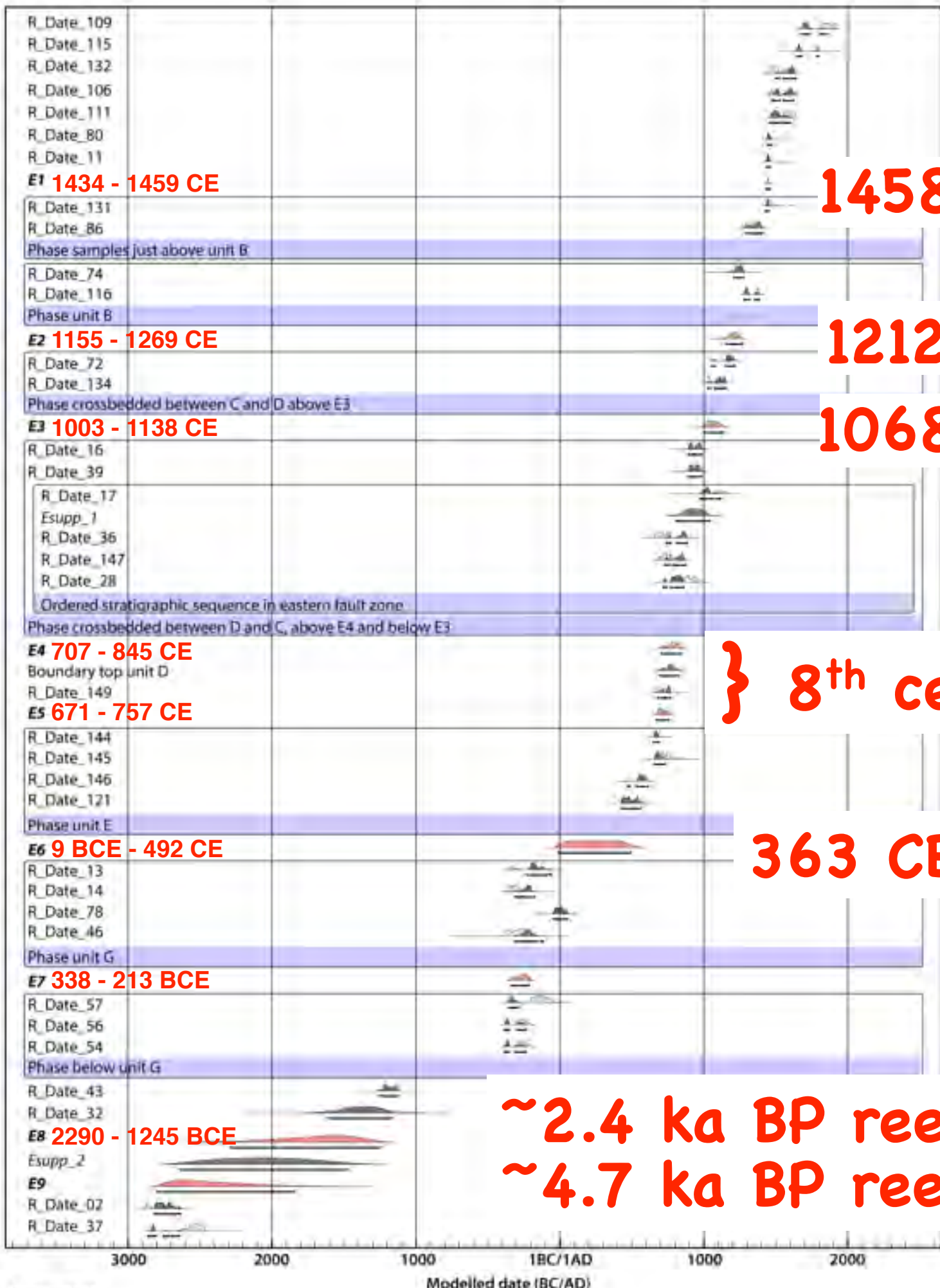
W

Datations au ¹⁴C

39 C¹⁴ dates

4 are reworked

+ few OSL dates (in progress)



1458 CE

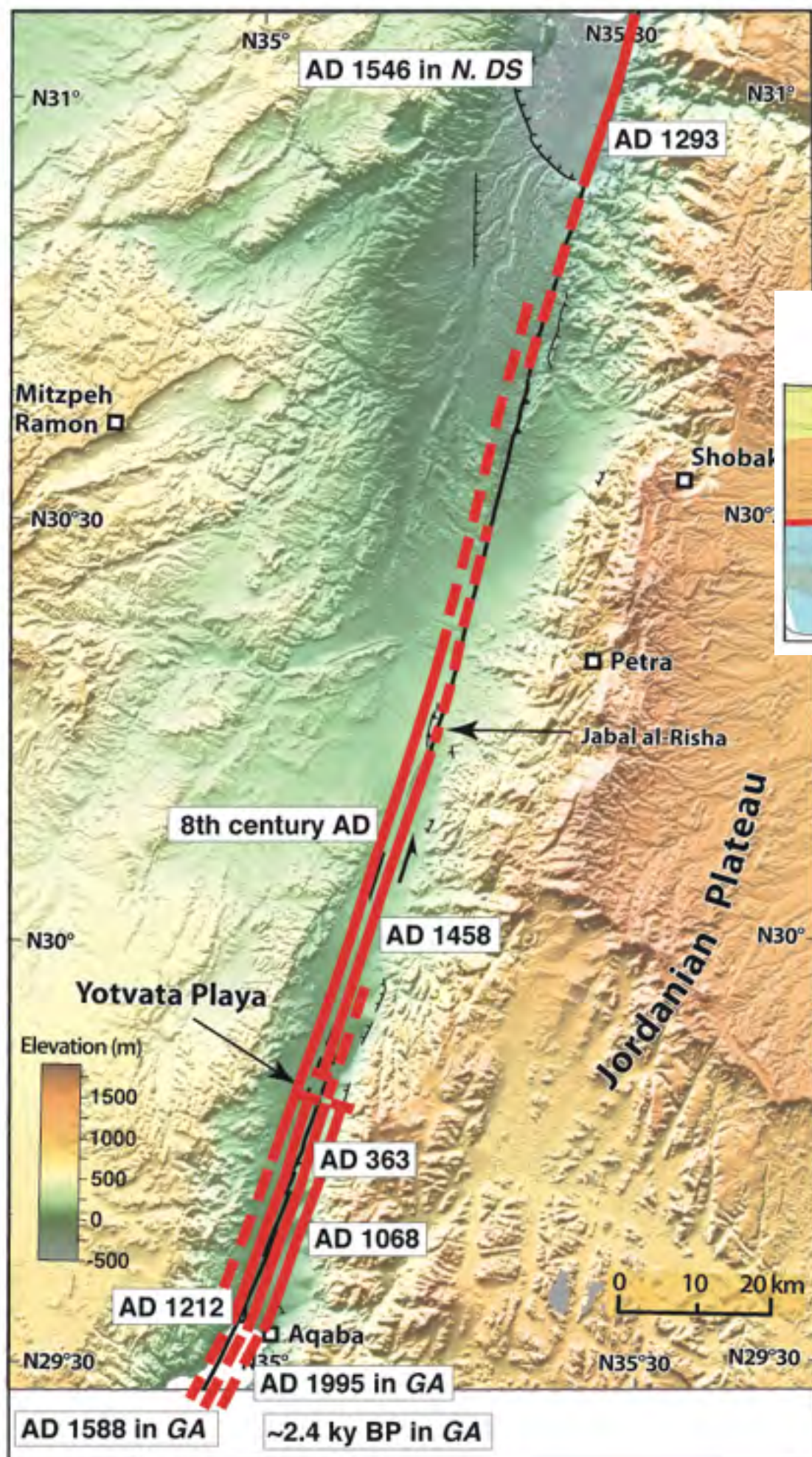
1212 CE

1068 CE

} **8th century crisis**

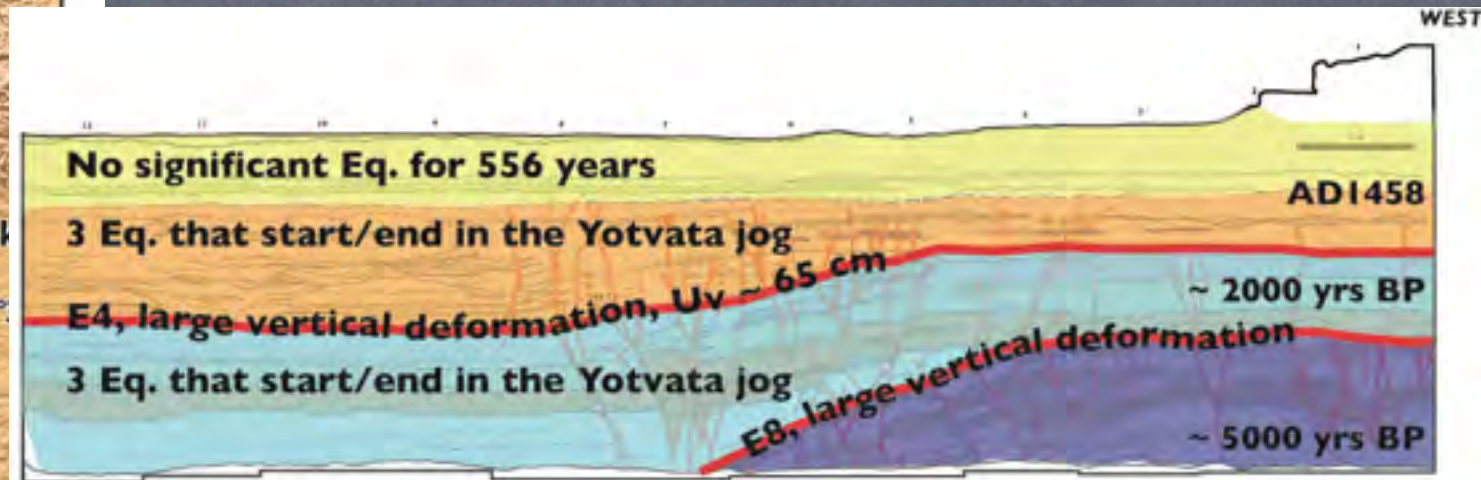
363 CE (?)

~2.4 ka BP reef submerged GA
~4.7 ka BP reef submerged GA



alternance entre

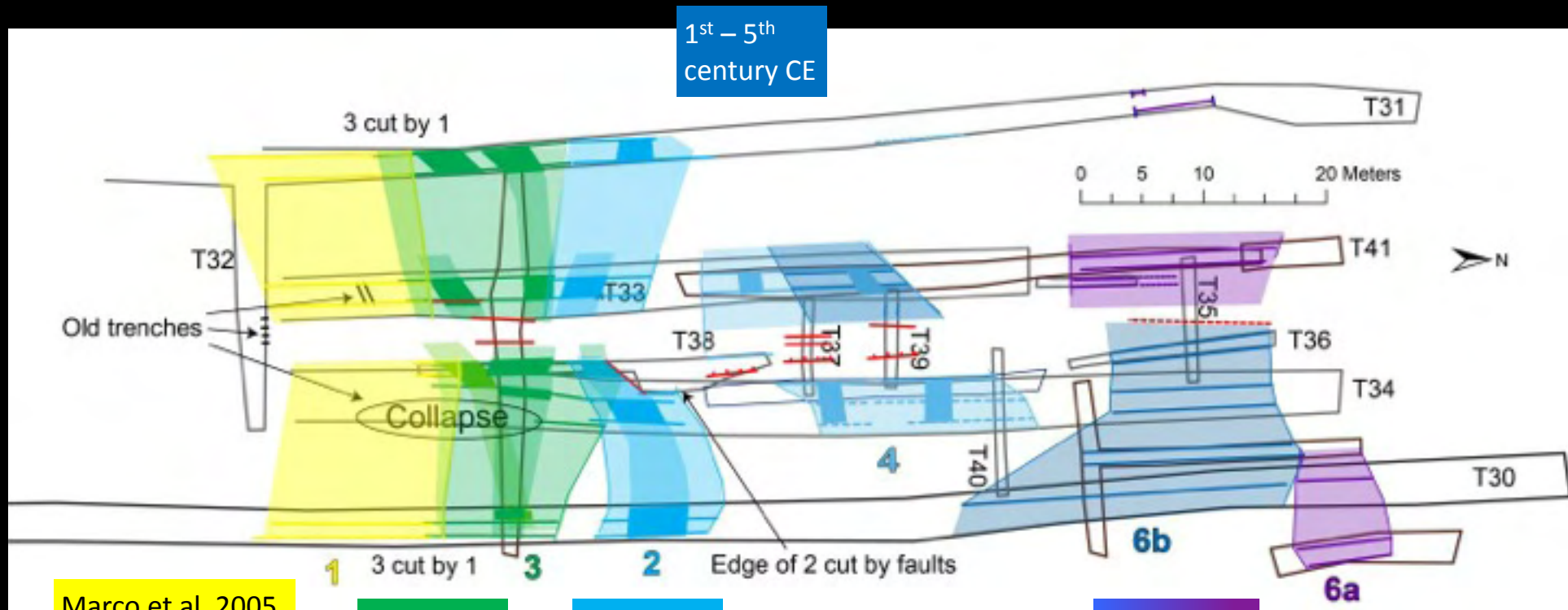
- périodes avec séismes (RT ~ 250 ans)
- périodes sans séismes (RT > 500 ans)



Pas de séismes depuis ~ 500 ans

⇒ 2.8m de glissement accumulé

Cartographie des talwegs et mesure des décalages



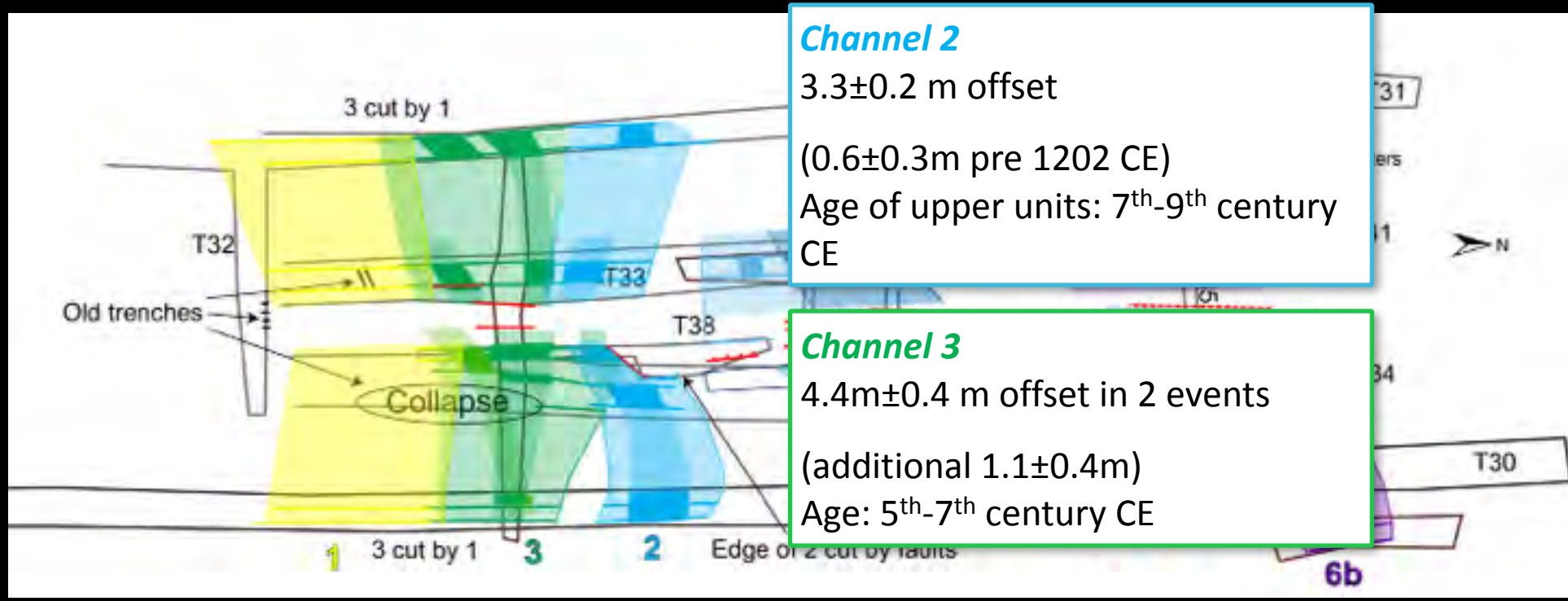
Marco et al. 2005
(Captured 1202,
1759 CE)

5th – 7th
century CE

7th – 9th
century CE

8th-5th
century BCE

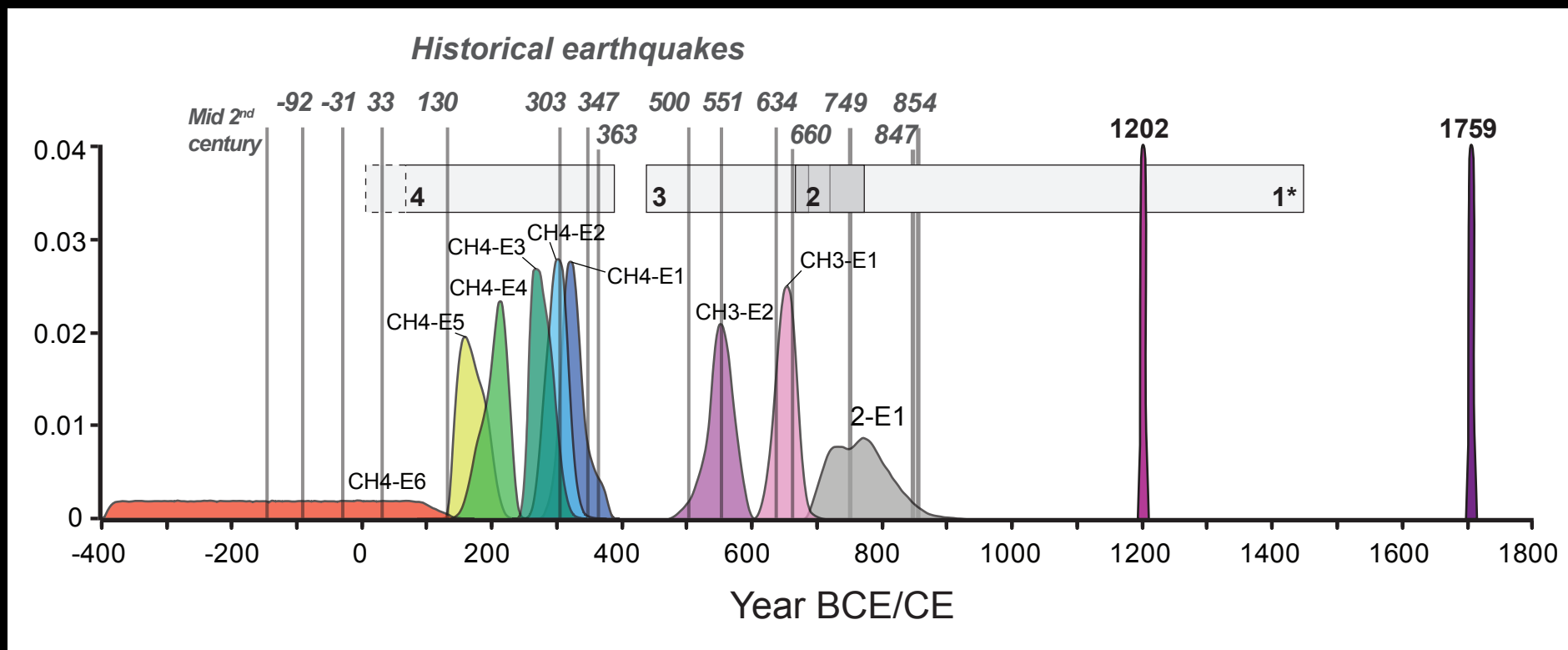
(Wechsler et al, 2014)



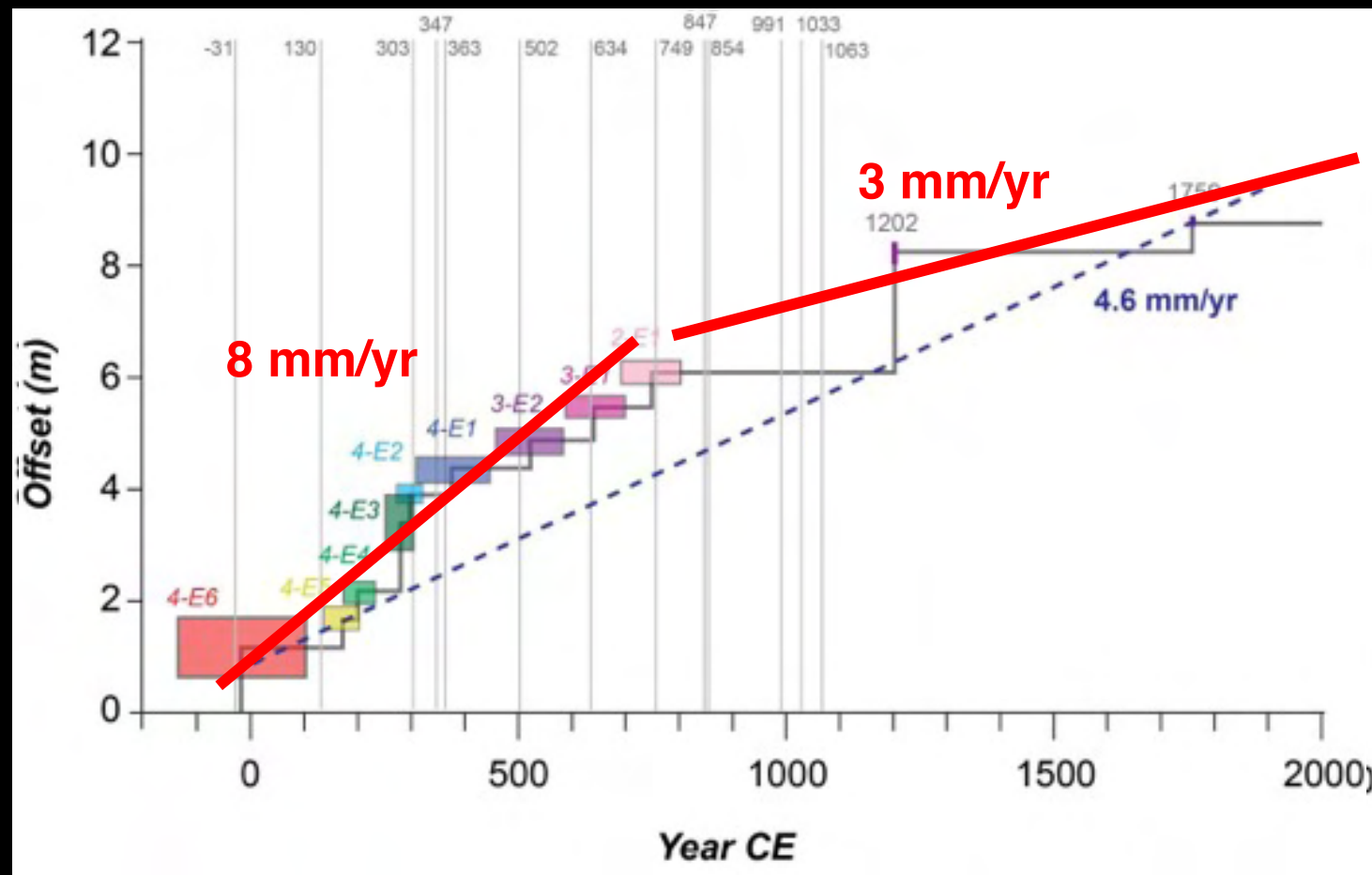
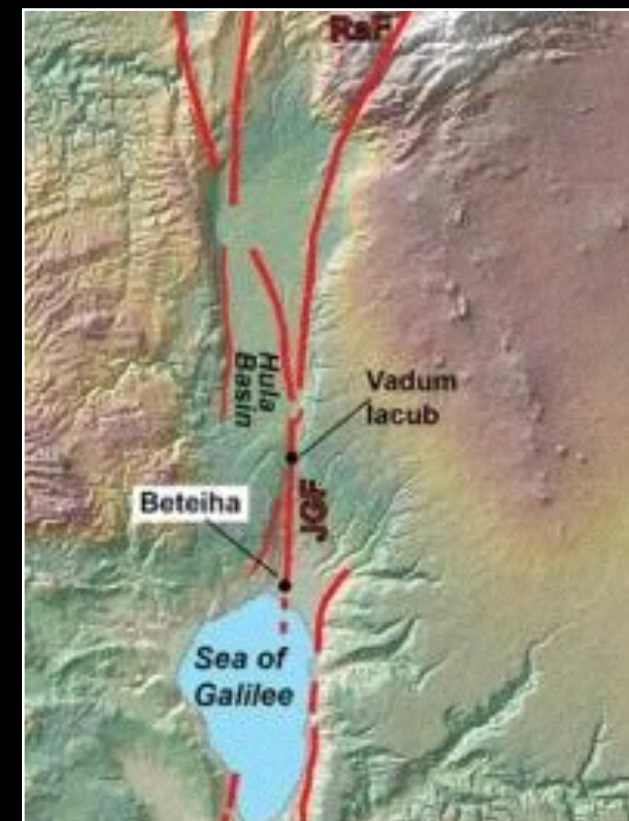
Channel 2
3.3±0.2 m offset
(0.6±0.3m pre 1202 CE)
Age of upper units: 7th-9th century CE

Channel 3
4.4m±0.4 m offset in 2 events
(additional 1.1±0.4m)
Age: 5th-7th century CE

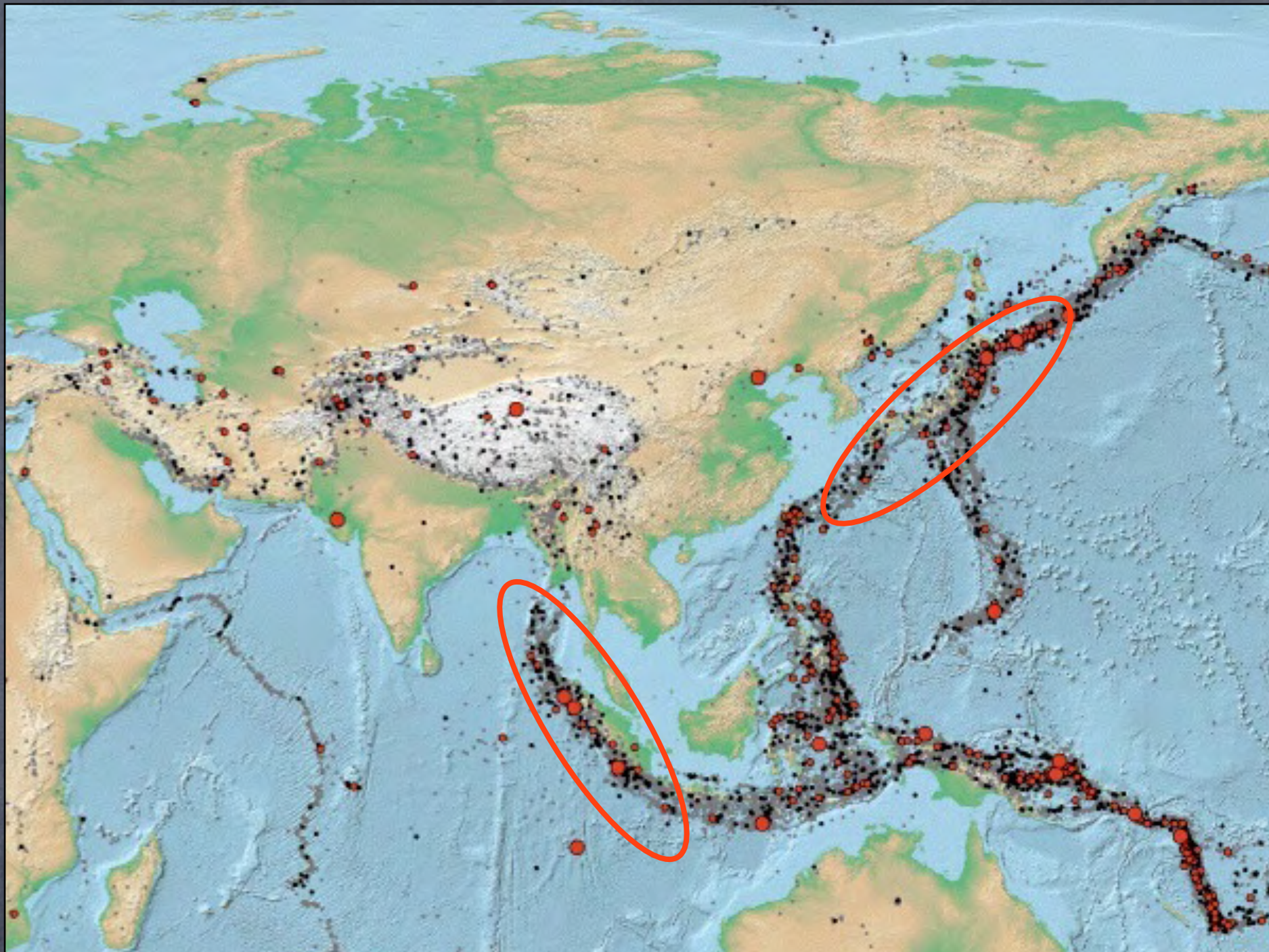
Datations C14



(Wechsler et al, 2014)

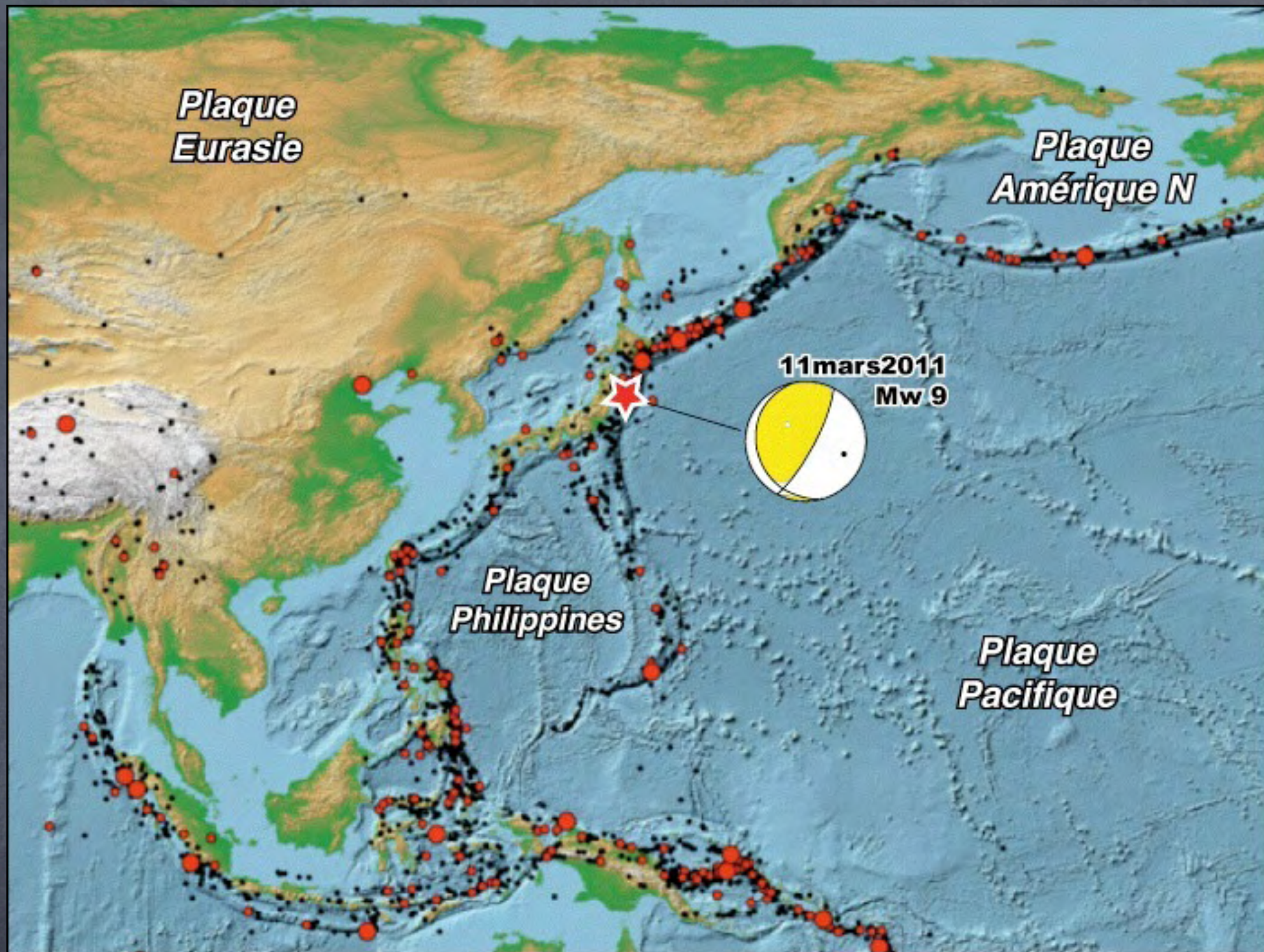


offset et datation
 variation du taux de
 moyenne sur 2000 ans
 glissement au cours du
 temps ou enregistrement
 trop court?

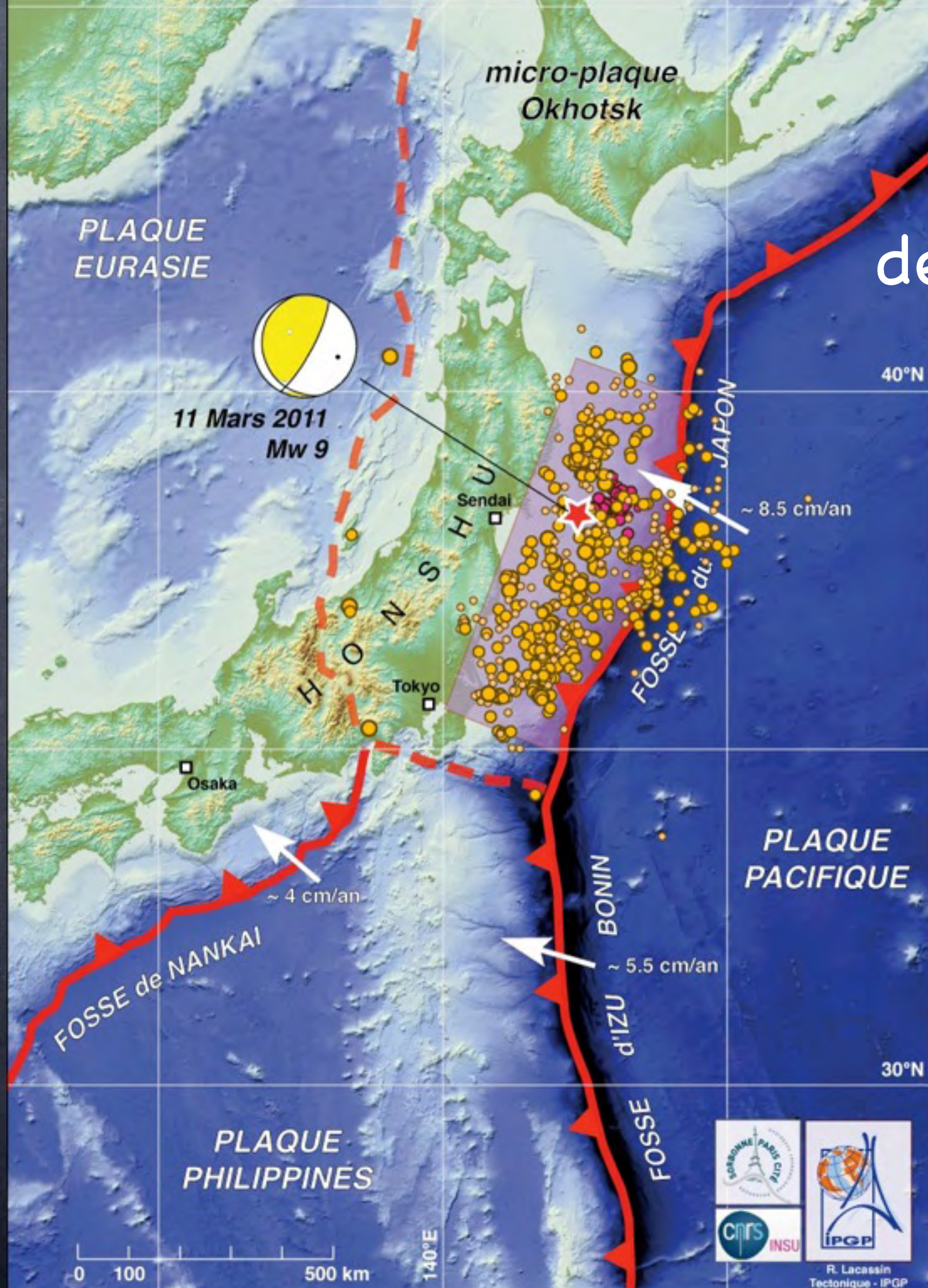


Lacassin - données USGS-NEIC M>5, 1973-2006

Et sous l'eau, comment ça se passe?
Des séismes de subduction fréquents en Asie



Le séisme du Japon, un méga-séisme de magnitude Mw9



des vitesses de plaques très rapides

Des déplacements co-sismiques de dizaines de metres

Rupture totale de l'interface de subduction depuis ~40km de profondeur jusqu'à l'émergence de la faille au niveau de la fosse du Japon

J A P A N

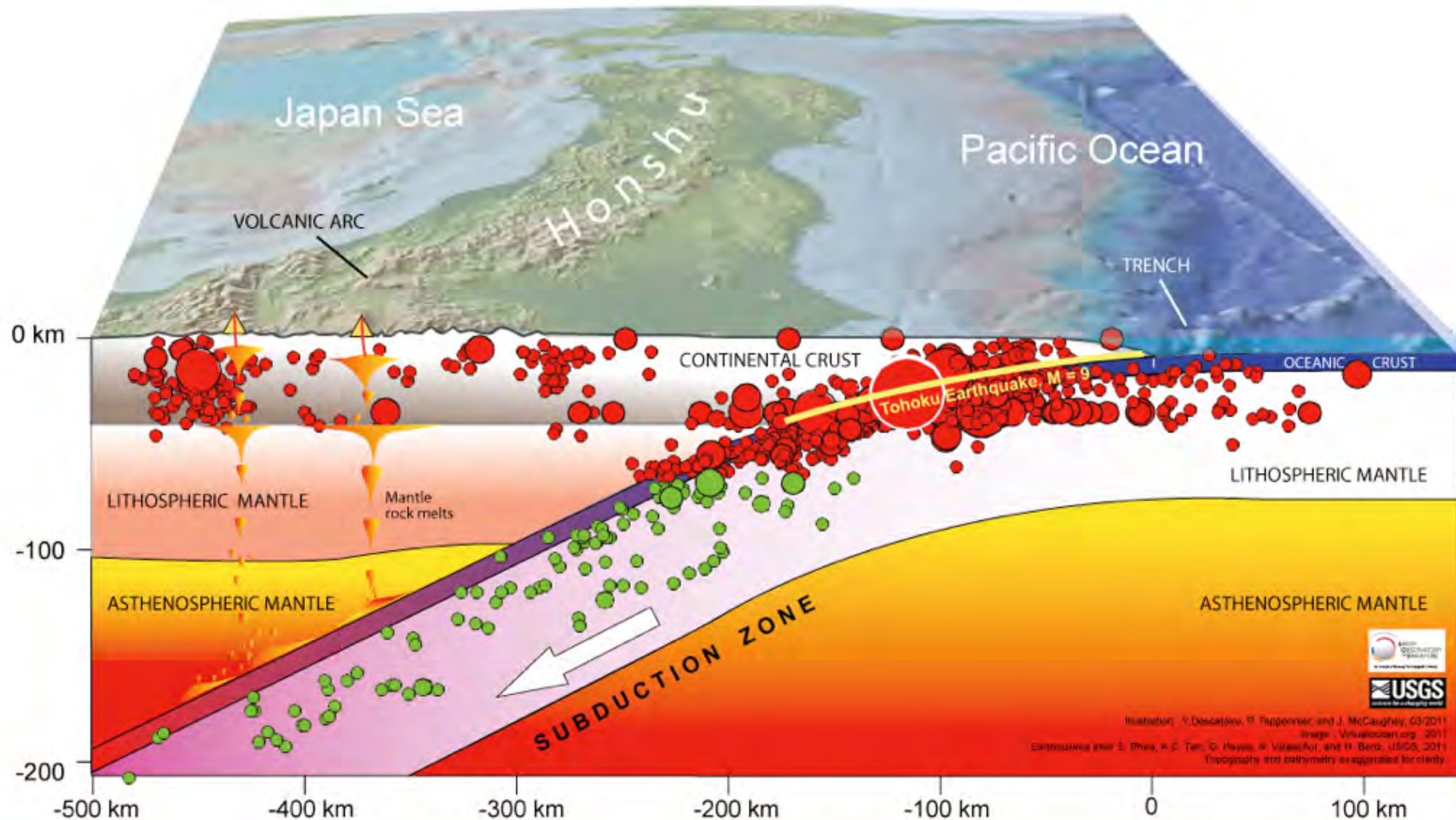


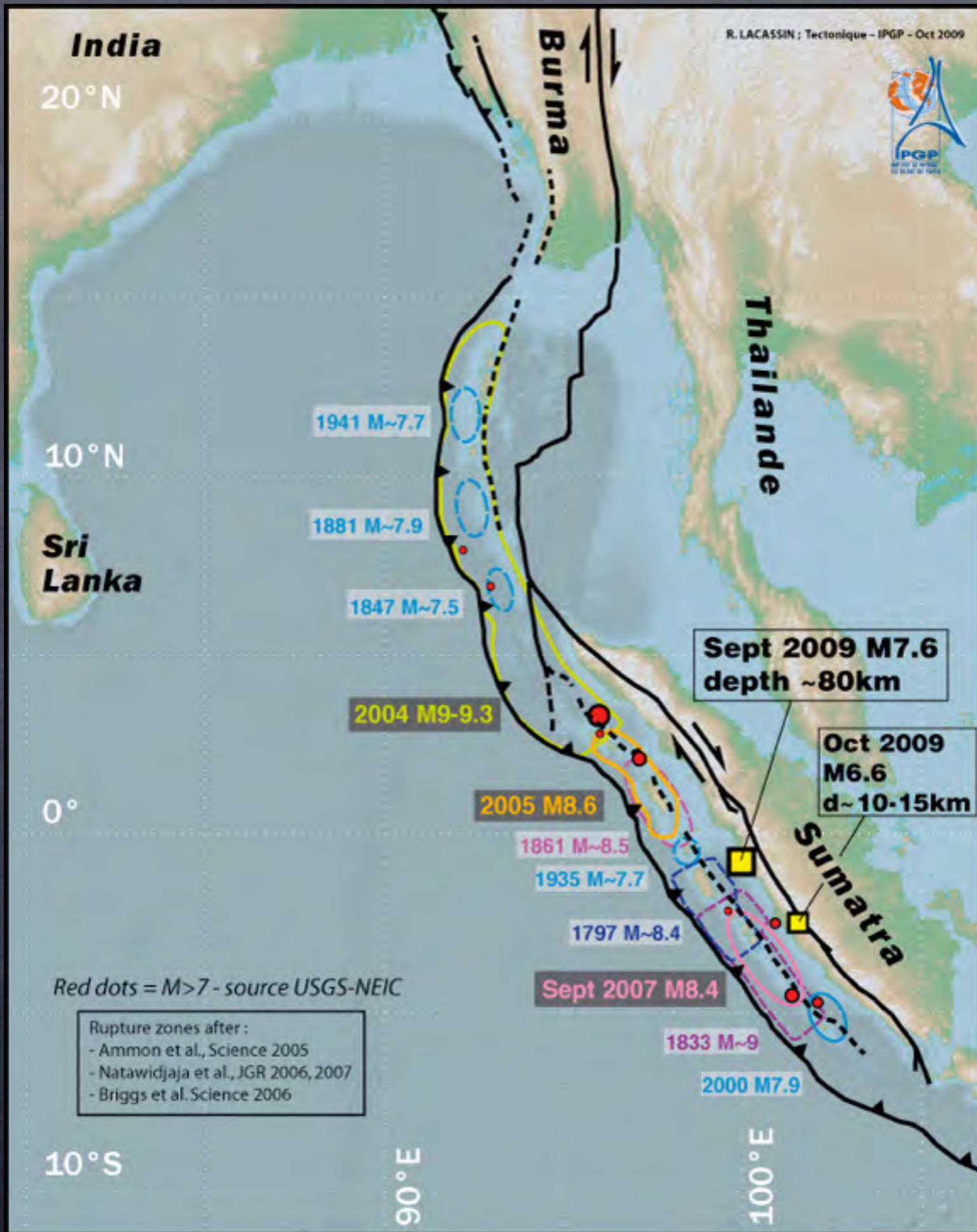
Illustration: Y. Descalco, B. Toppo, and J. McCaughey, 03/2011
Image: VirtualOcean.org, 2011
Earthquake and S. Thwa, A. C. Tan, G. Hayes, A. Villasenor, and H. Benz, USGS, 2011
Topography and bathymetry exaggerated for clarity

La génération du tsunami associé



Ces séismes sont-ils si exceptionnels?
peut on remonter dans le temps?

Le cas de l'autre subduction asiatique, Sumatra



La subduction de l'arc de Sumatra, 4 séismes de mag. >8 en 12 ans

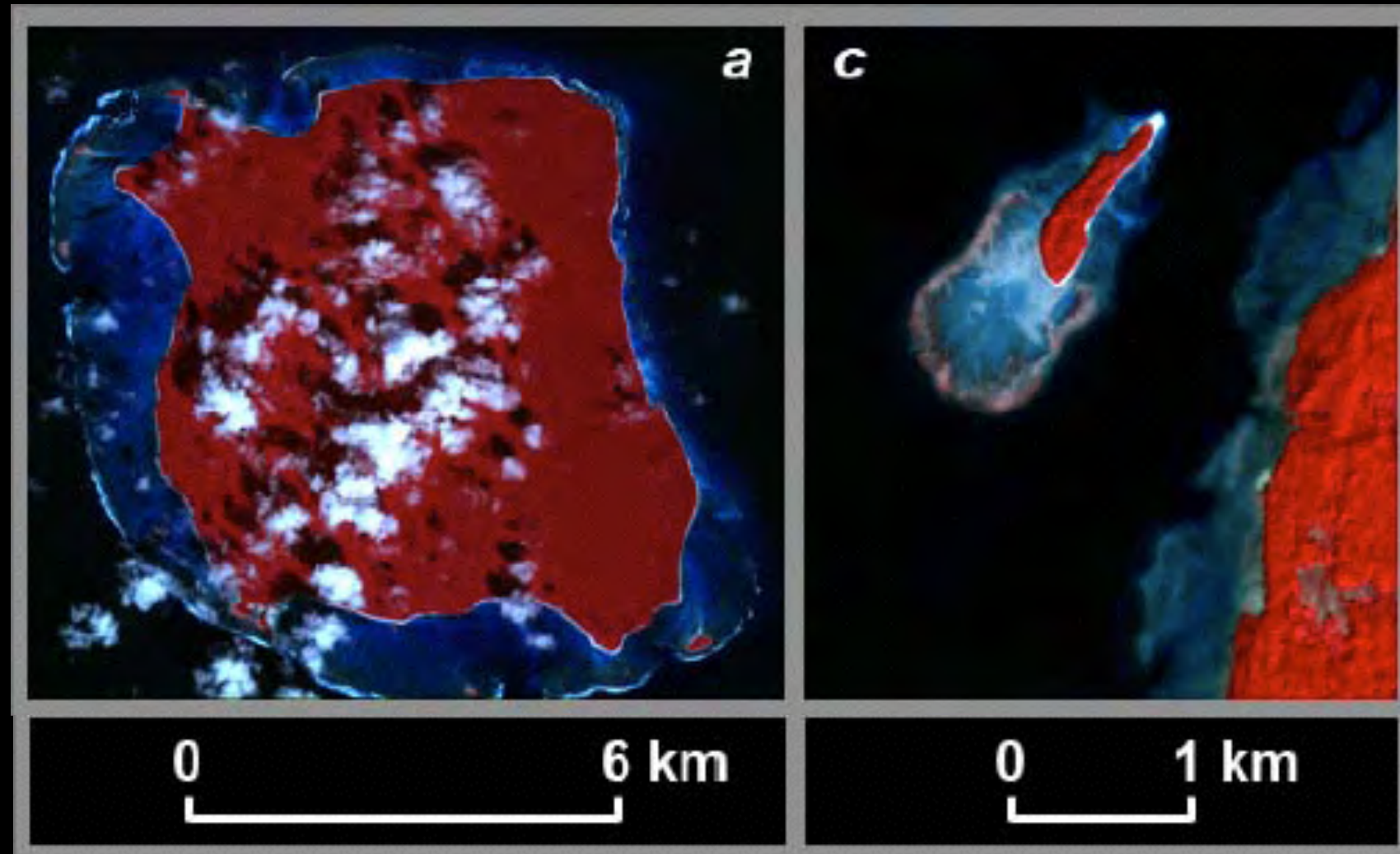


(after Sieh et al.)

Quel sont les marqueurs morphologiques utilisables?

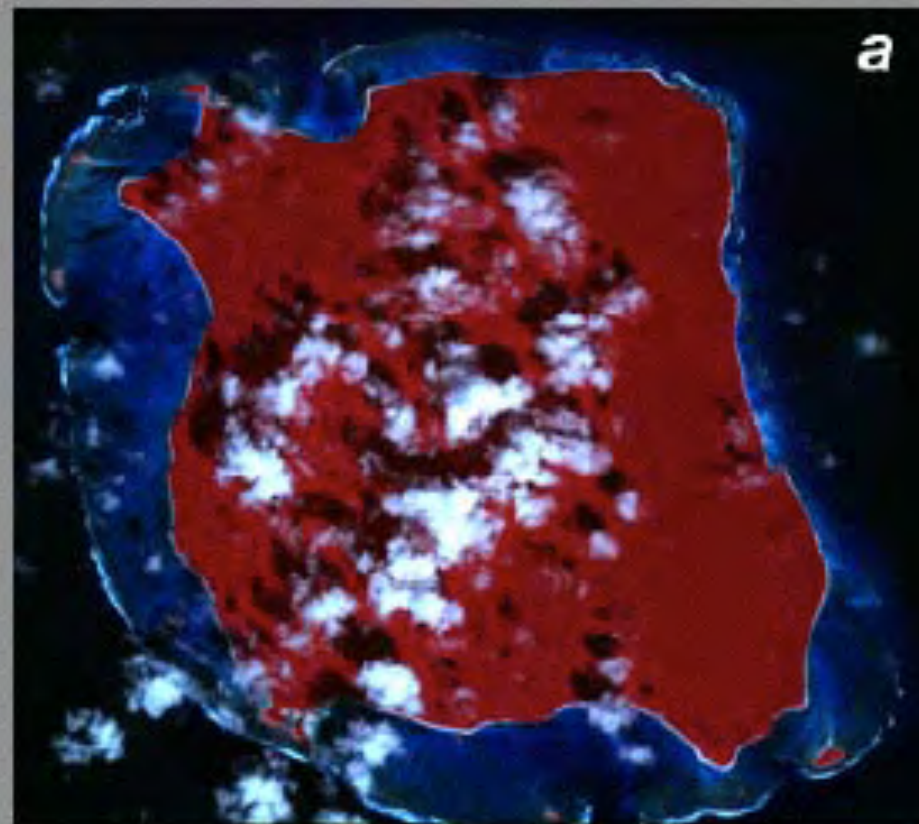
Andaman and Nicobar island groups

before

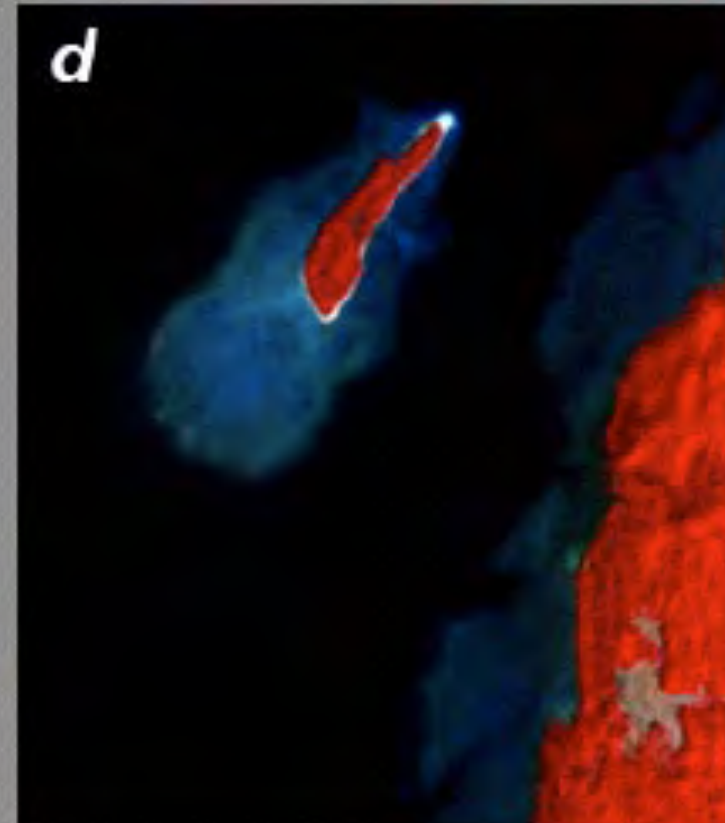


Andaman and Nicobar island groups

before



after



0 6 km

0 1 km



(after Sieh et al.)

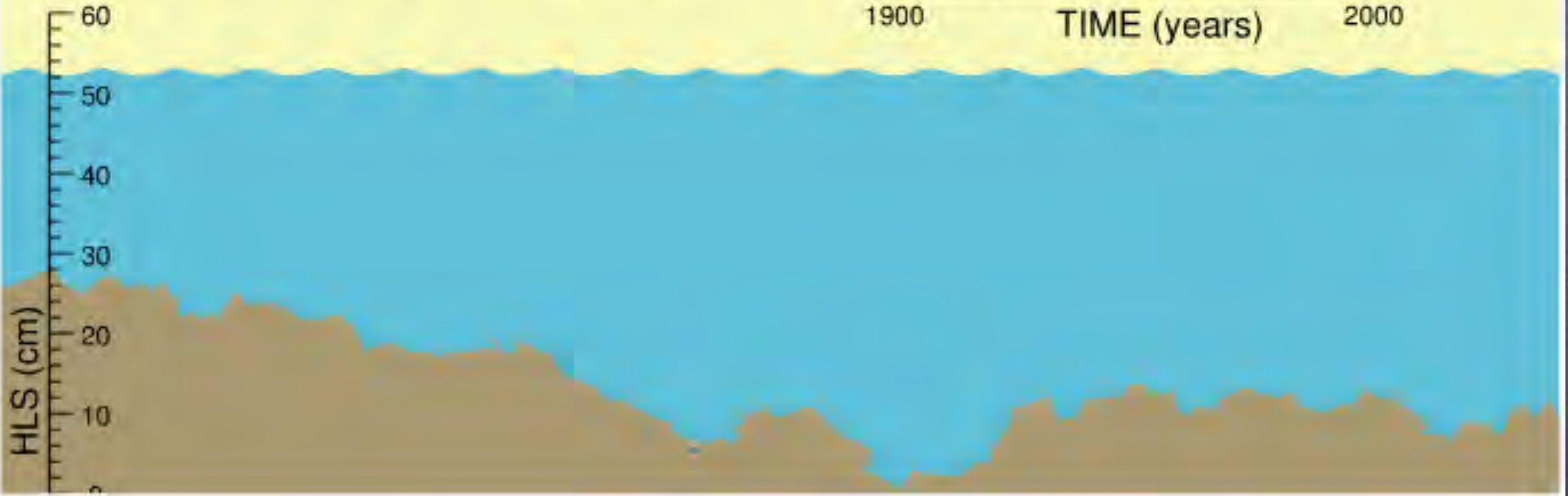
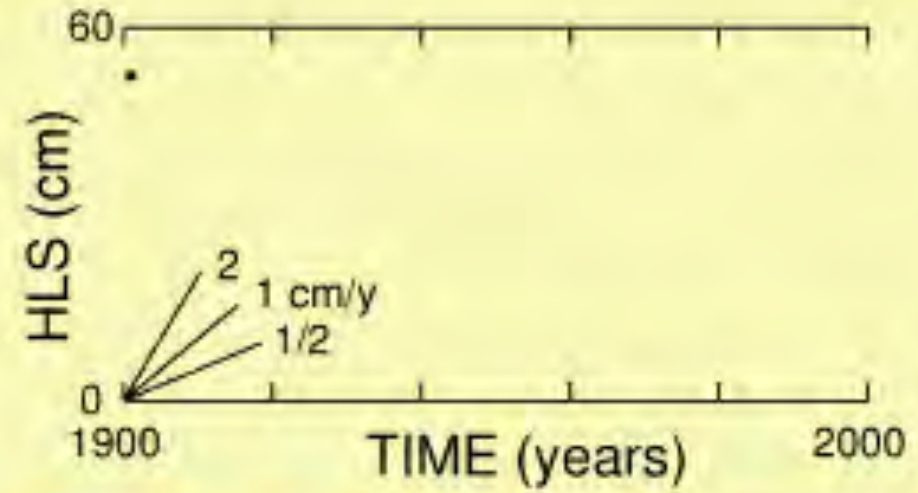
le niveau relatif de la mer par rapport aux terres émergées a changé de façon importante

155 cm



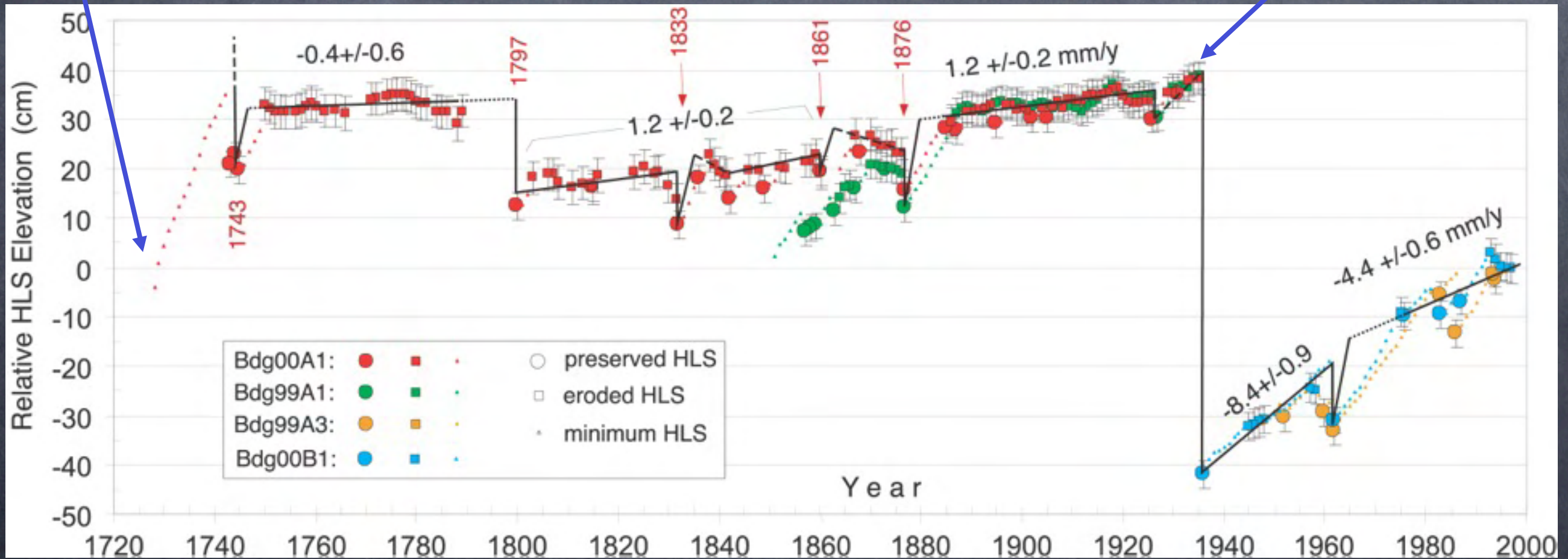
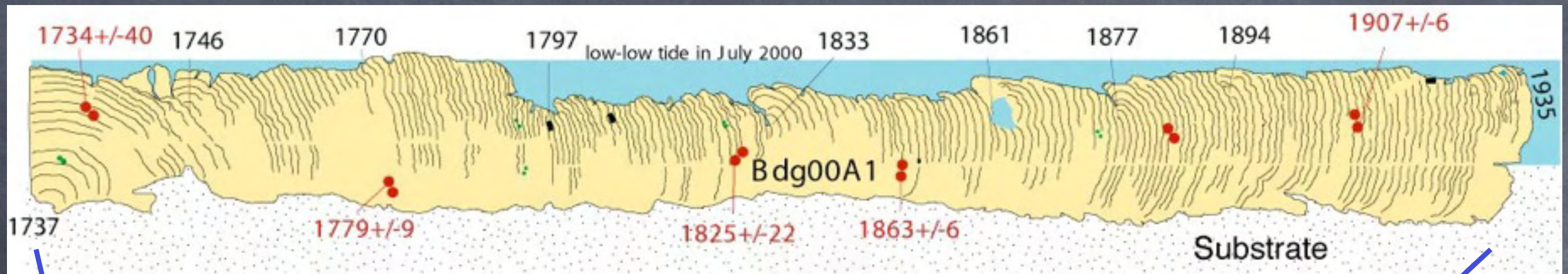
Synthetic Coral Growth History

Stable Coastline
25 cm Emergence Event in 1952



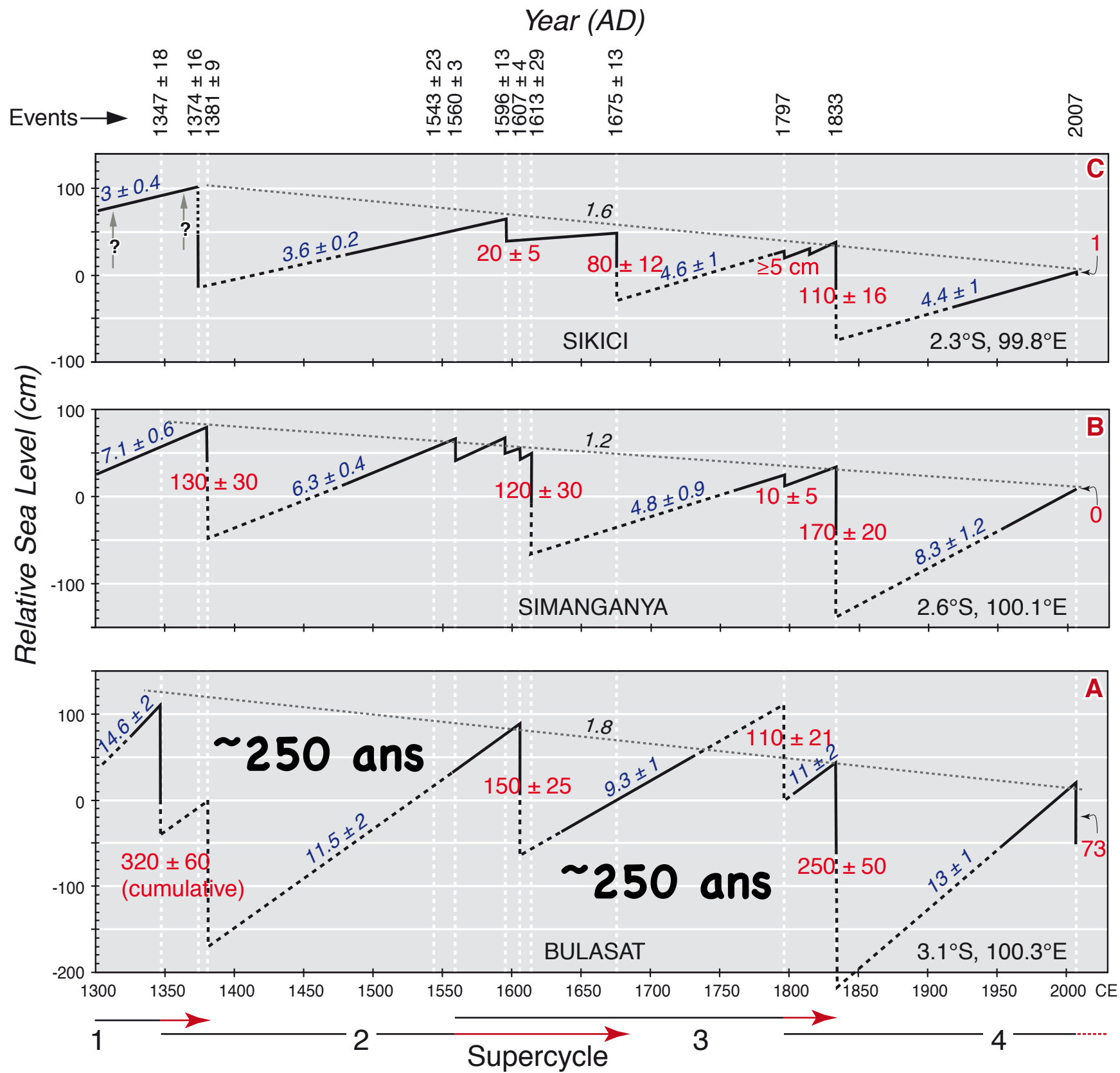
(after K. Sieh)

Histoire de corail



(after K. Sieh)

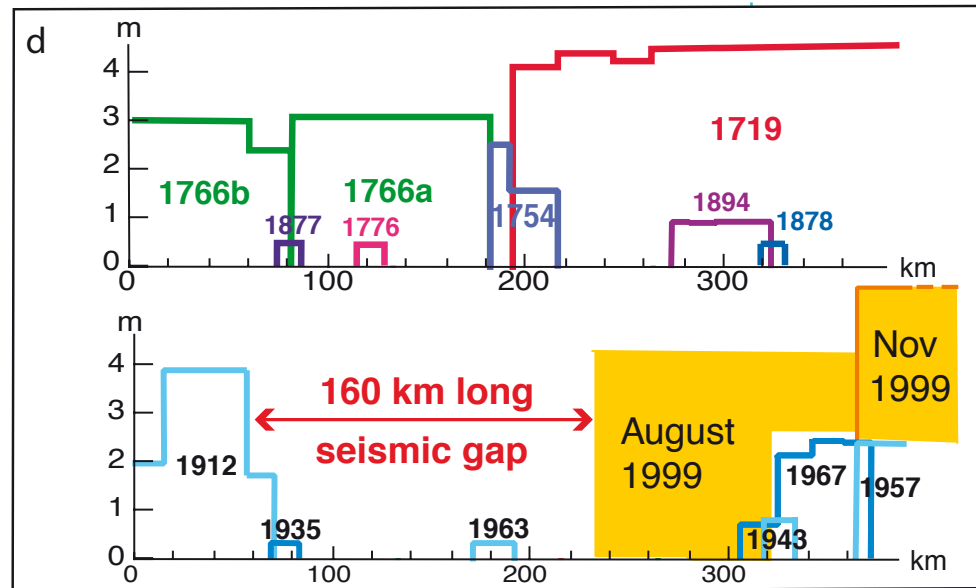
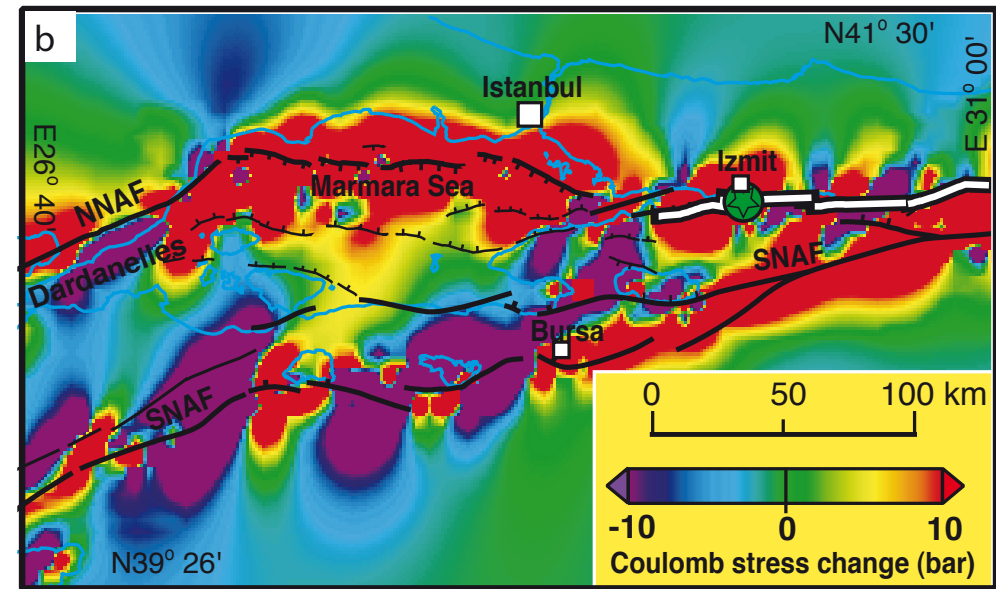
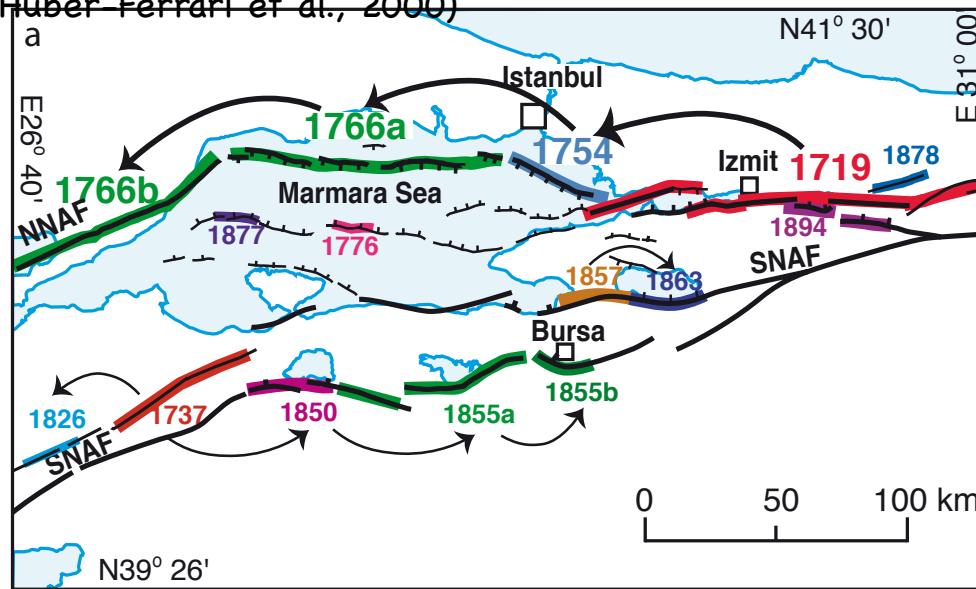
Paleogeodetic records near the Equator show very-long-term changes in vertical rates of deformation



(Sieh et al.,

Les coraux permettent de reconstruire l'histoire passée des séismes le long de la subduction

(Huber Ferrari et al., 2000)



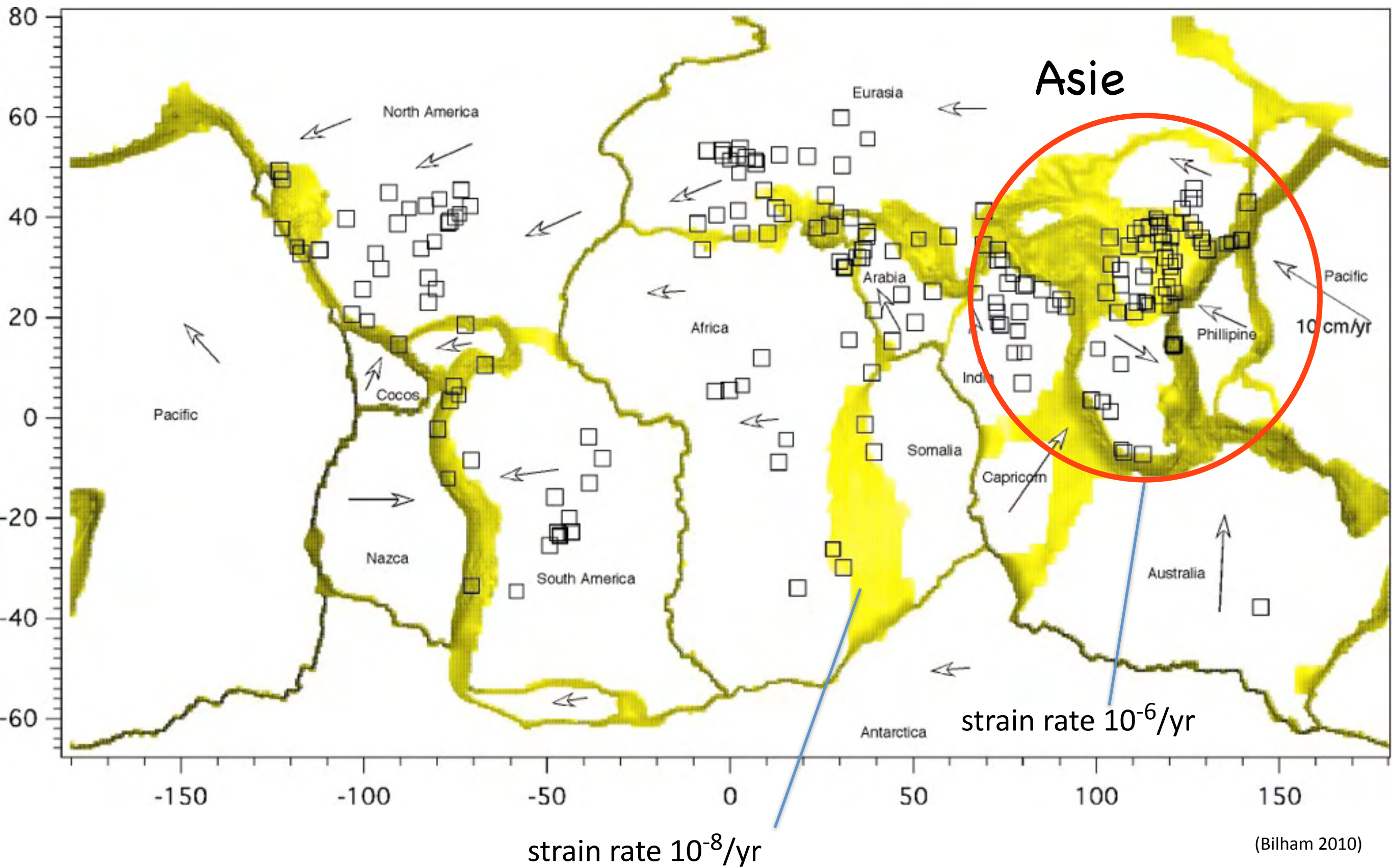
Une prédiction
mais pas une
prévision !

Table 1. Earthquake probabilities for faults within 50 km of Istanbul beginning May 2000. "Combined" is the probability for the three faults. Quoted uncertainties are one standard deviation. "Background" refers to renewal; "interaction" includes renewal and interaction by stress transfer.

Fault	30-year (%)		10-year (%)		1-year (%)	
	Interaction	Background	Interaction	Background	Interaction	Background
Yalova	33 ± 21	22 ± 18	14 ± 11	7 ± 7	1.7 ± 1.7	0.8 ± 0.8
Prince's Islands	35 ± 15	26 ± 12	16 ± 9	10 ± 6	2.1 ± 1.6	1.1 ± 0.7
Marmara	13 ± 9	11 ± 8	5 ± 5	4 ± 4	0.6 ± 0.7	0.5 ± 1.0
Combined	62 ± 15	49 ± 15	32 ± 12	20 ± 9	4.4 ± 2.4	2.3 ± 1.5

(Parson et al., 2000)

Super-citées et déformation tectonique



(Bilham 2010)

velocities from GPS



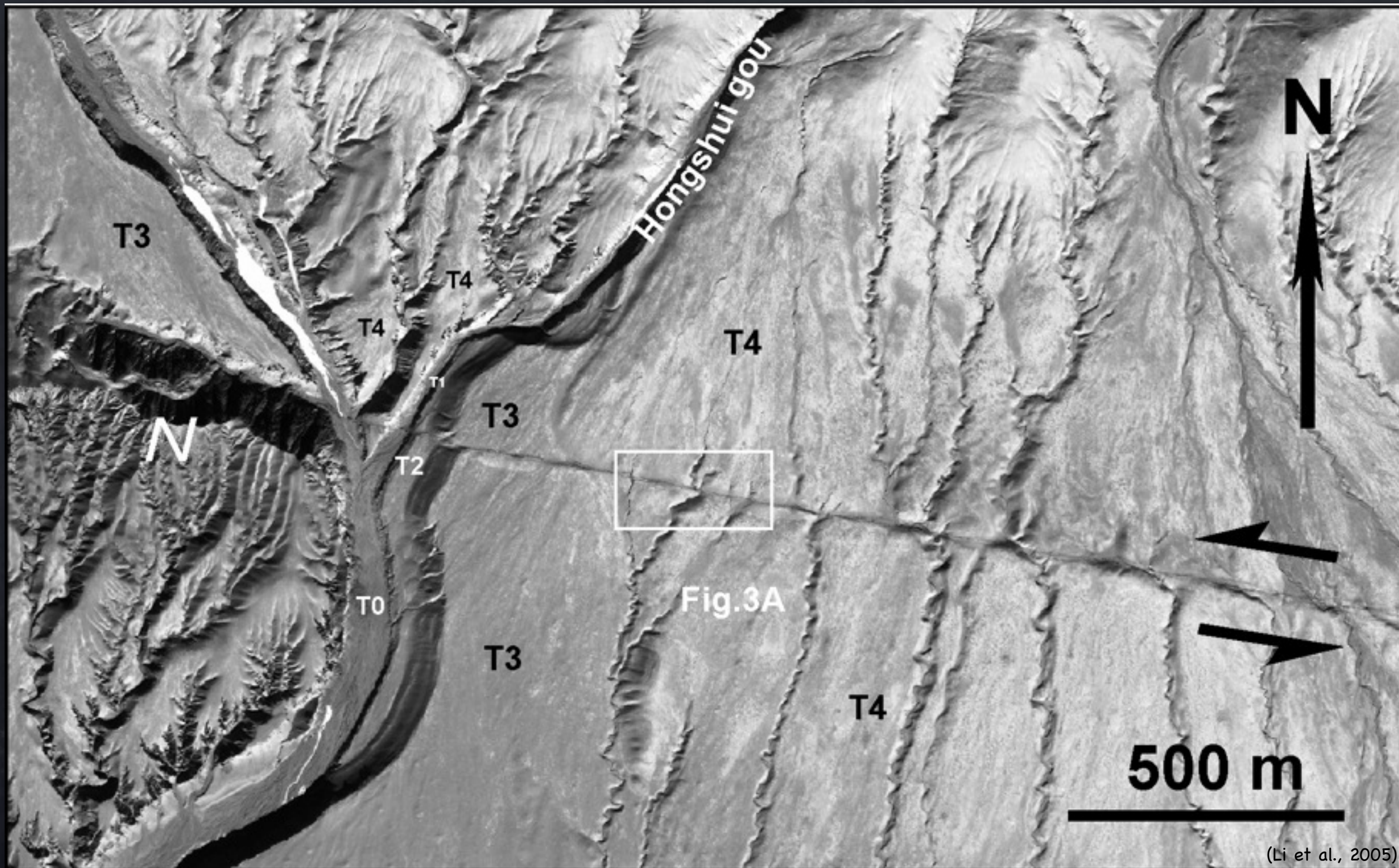
(photographie Klinger 2001)

Publications librement accessibles : www.ipgp.fr/~klinger

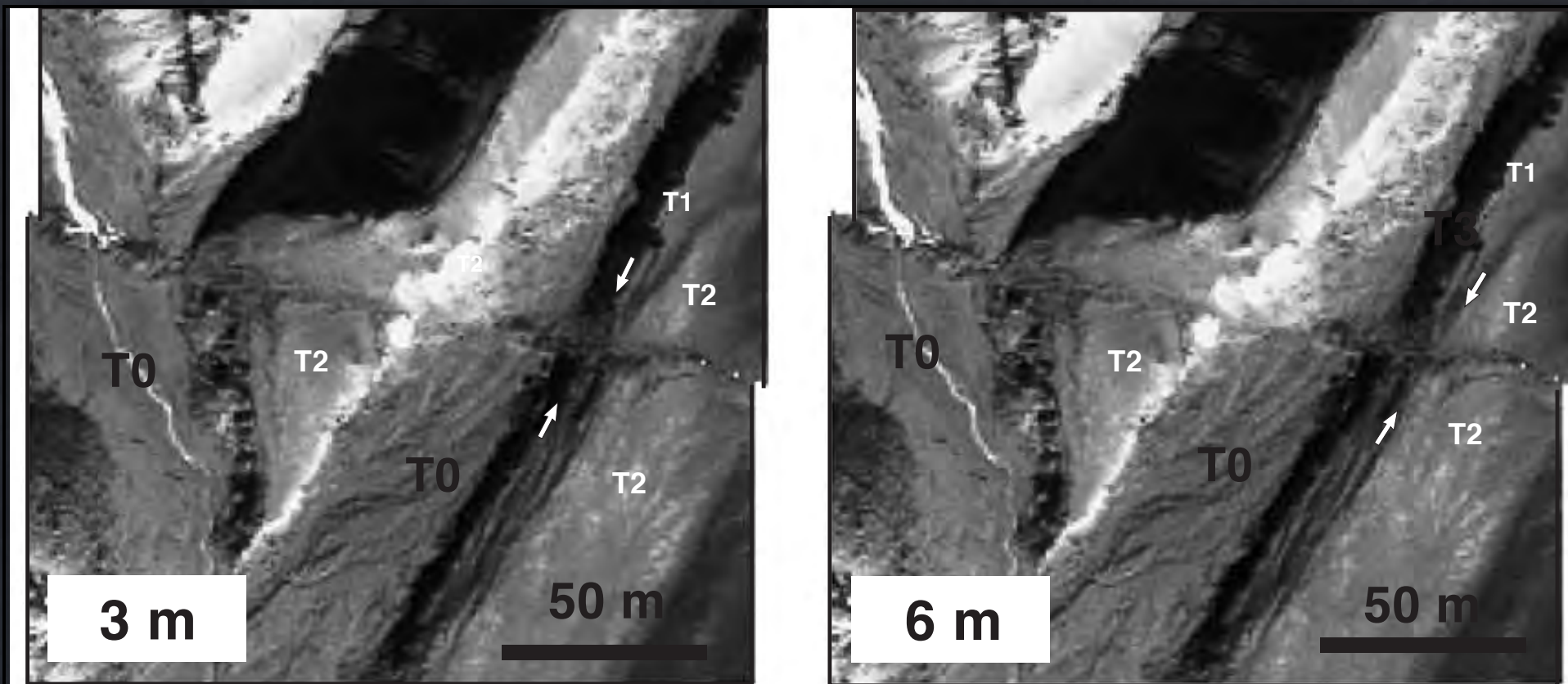
Les séismes, brique élémentaire d'un processus qui dure longtemps

(Li et al., 2005)

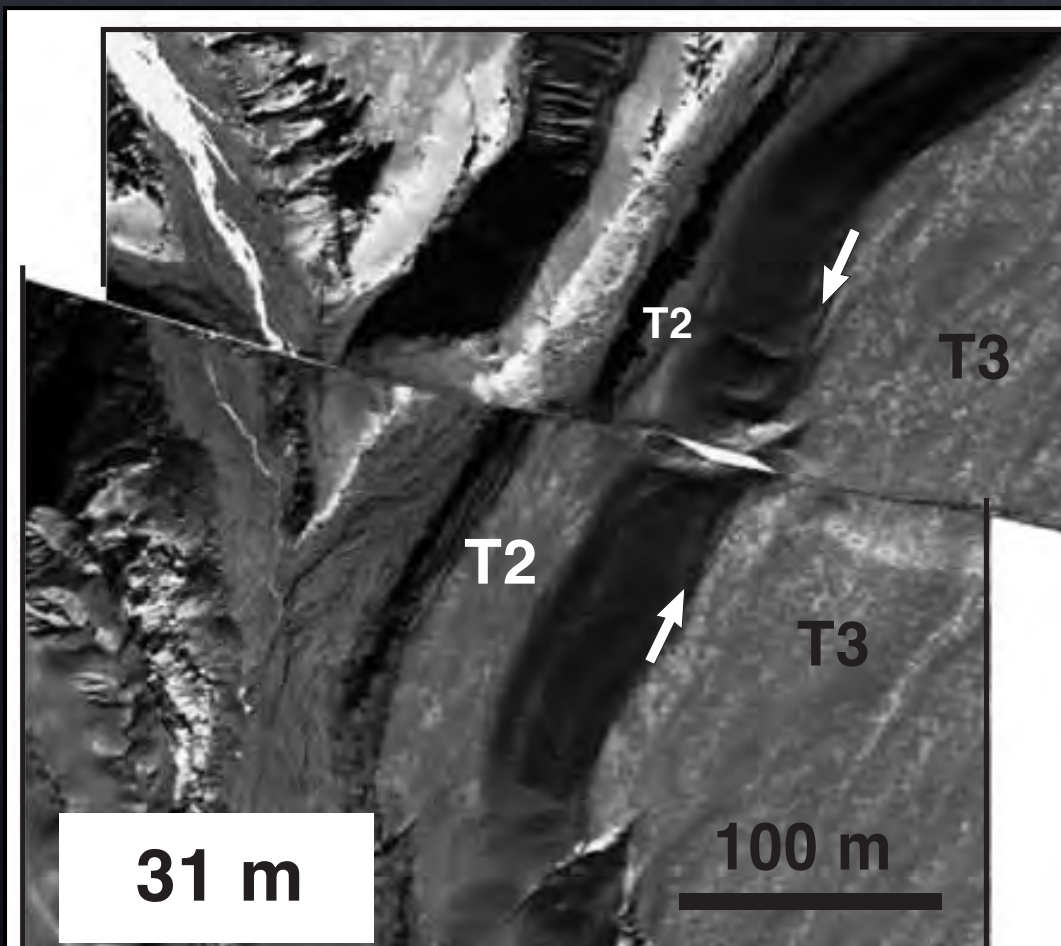




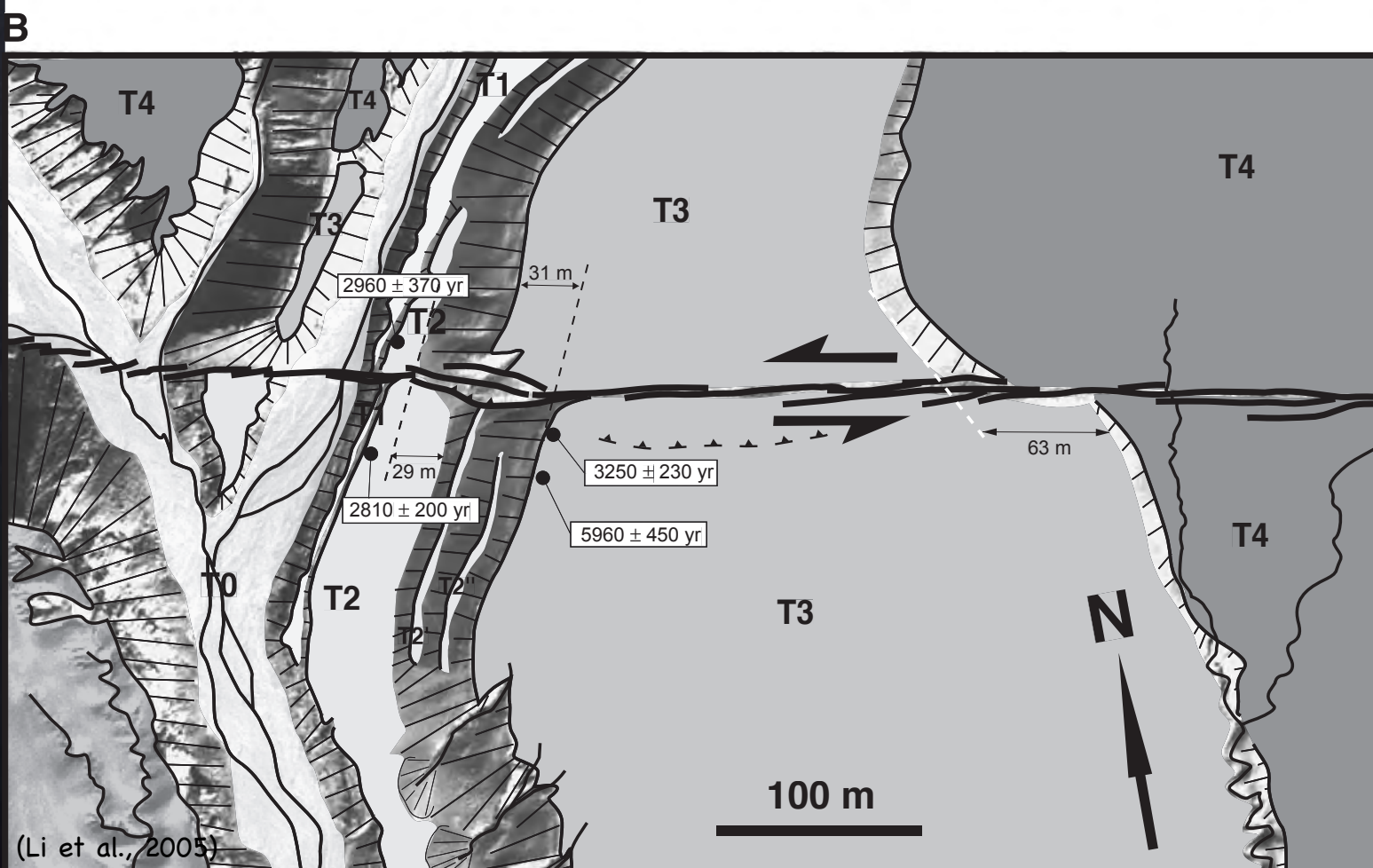
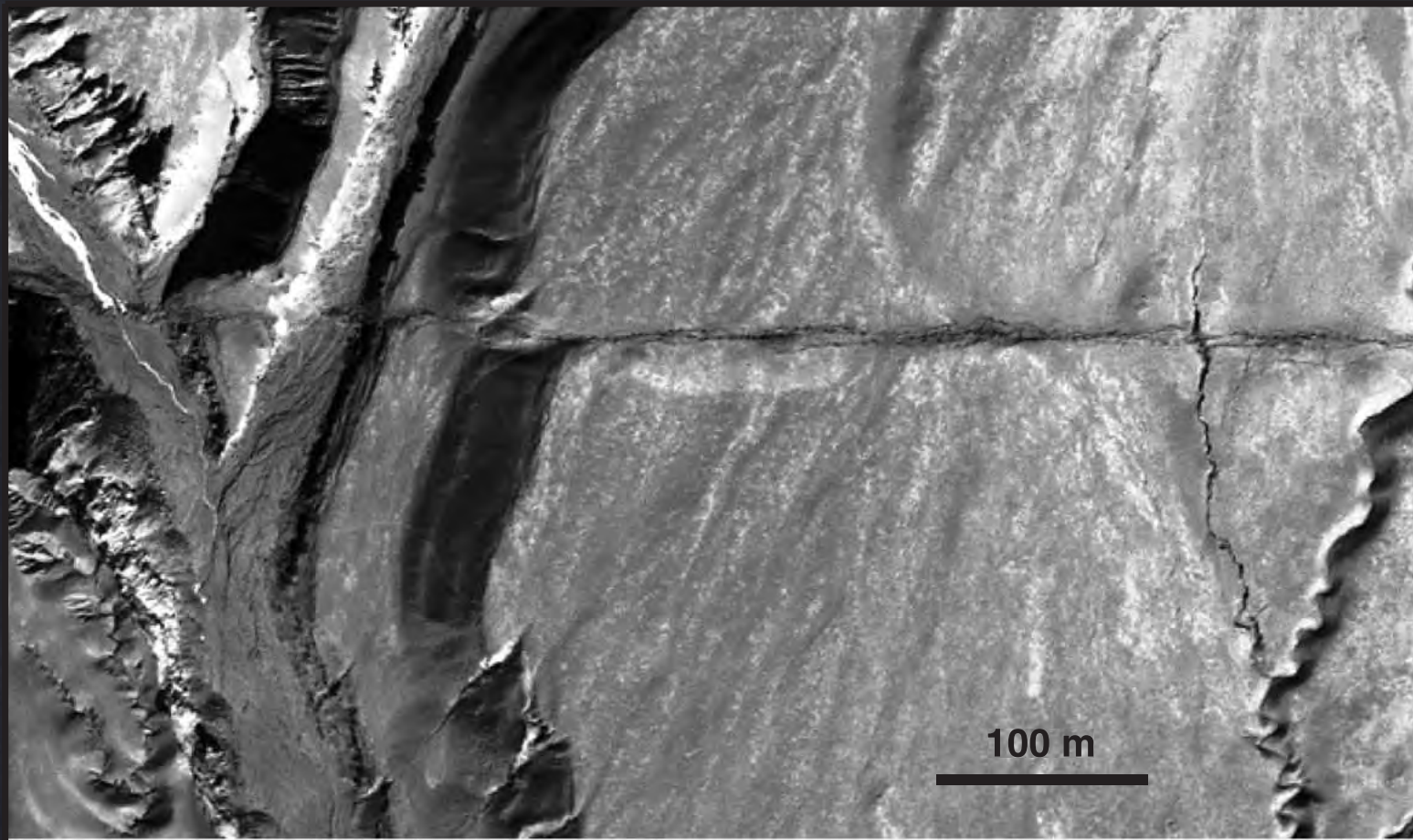
(Li et al., 2005)



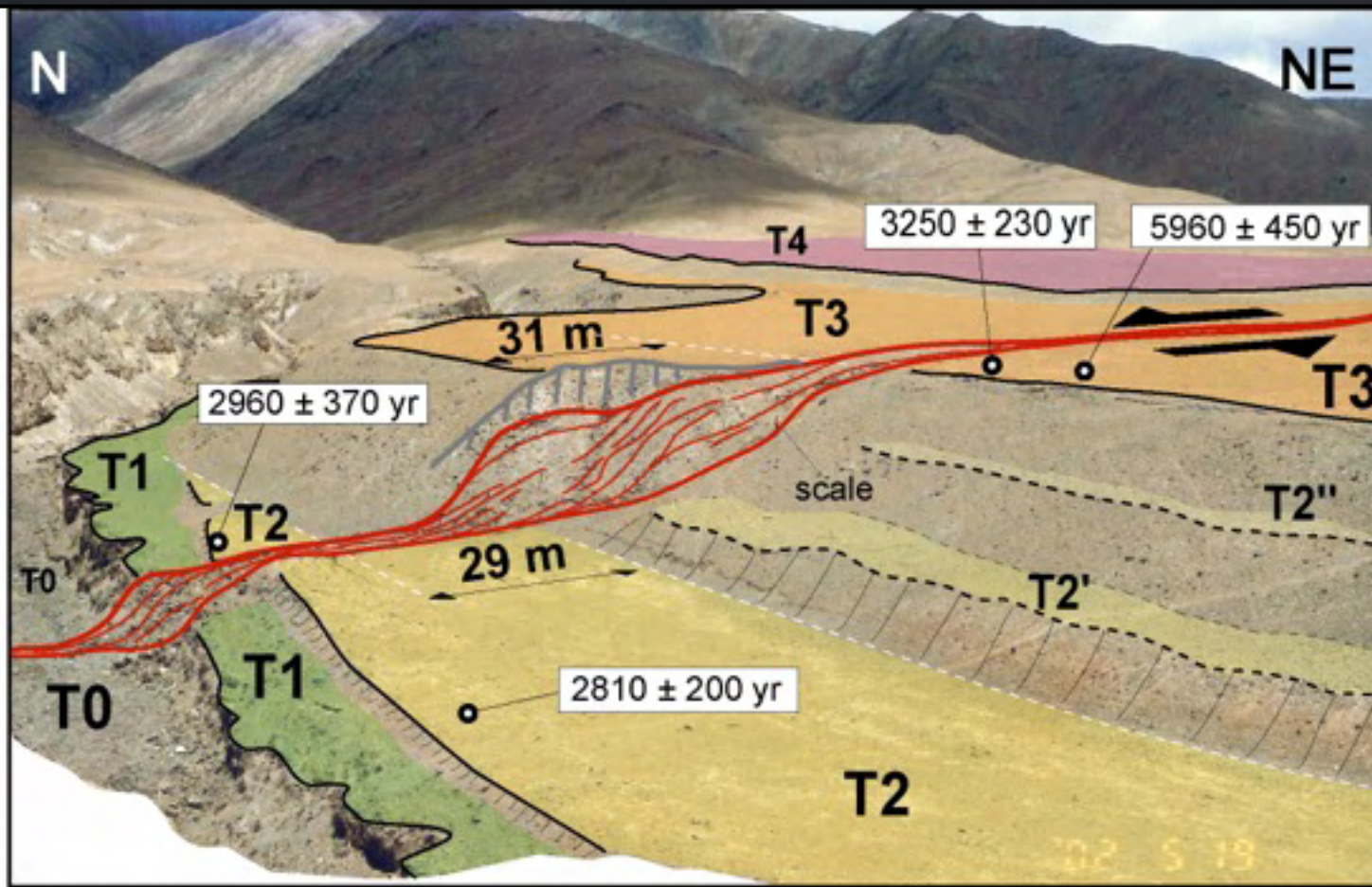
On retrouve la trace des séismes anciens



la trace de beaucoup de séismes!

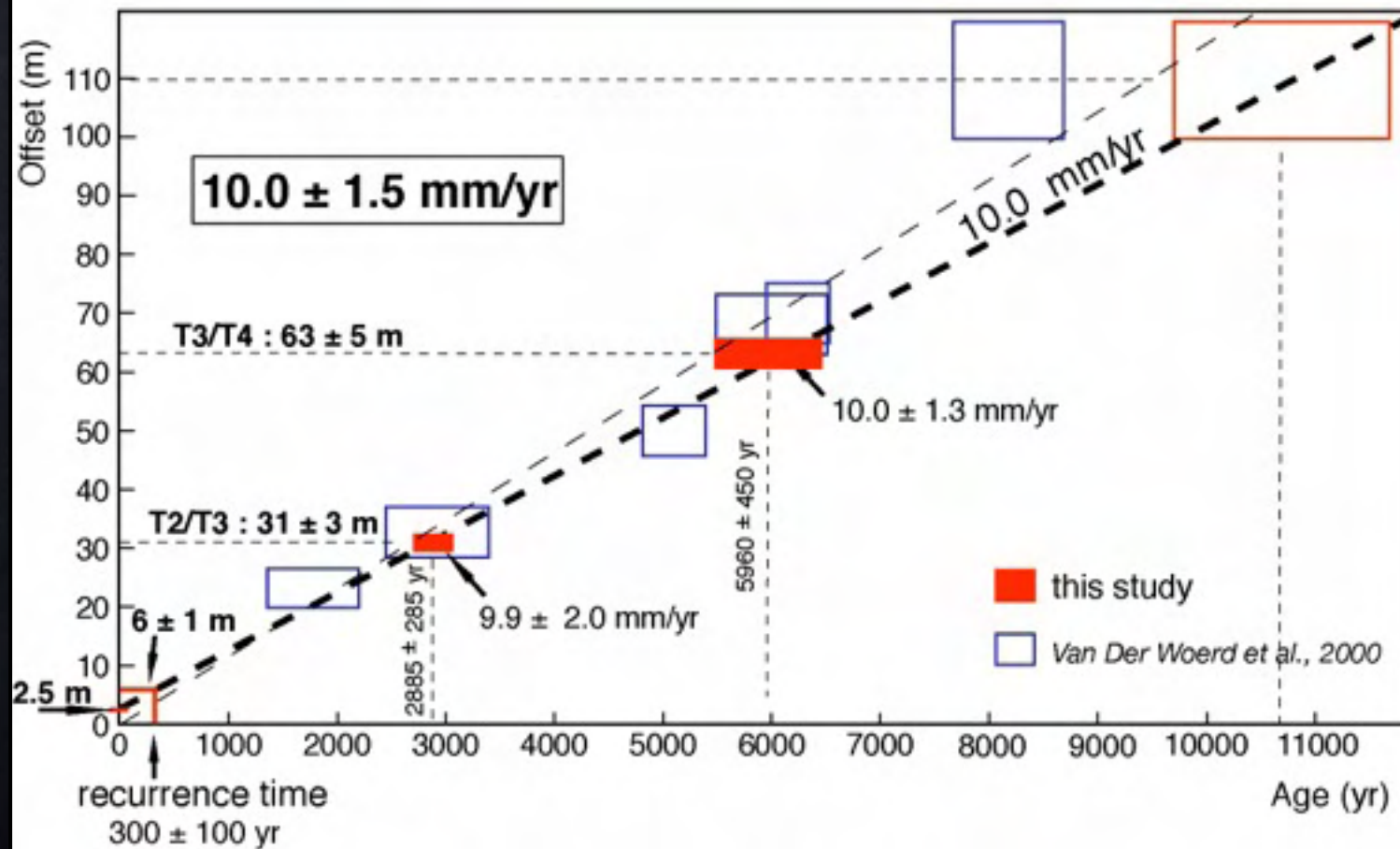


Il ne reste plus qu'à dater pour connaître l'âge des objets du paysage



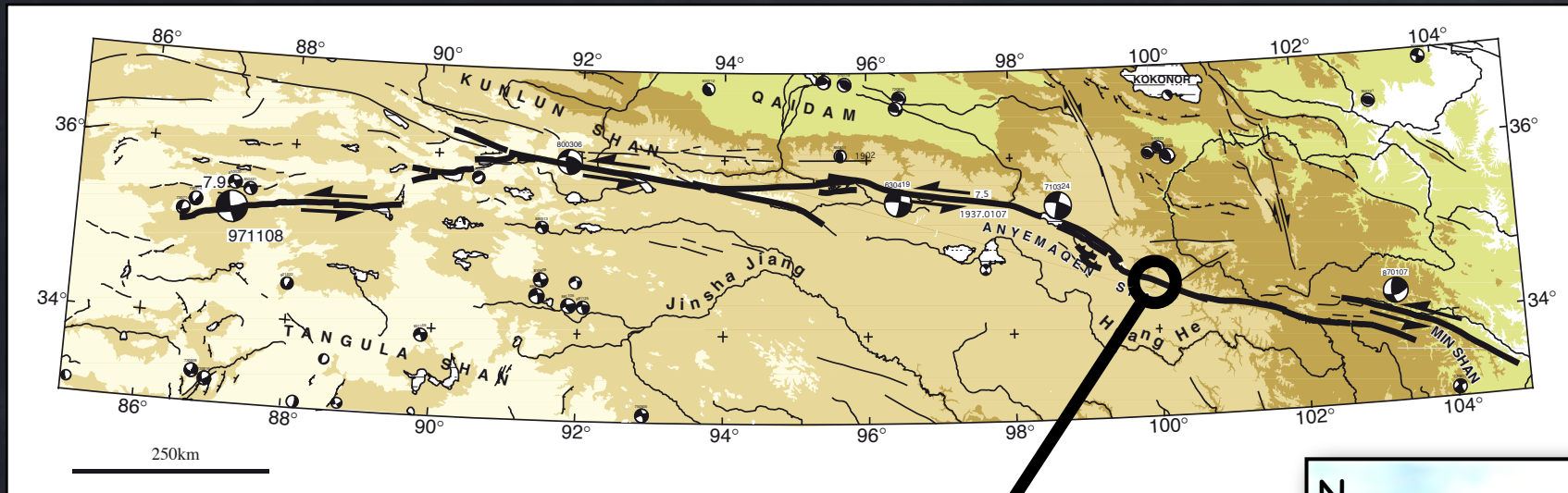
Quand on connaît la vitesse et le déplacement pour chaque séisme

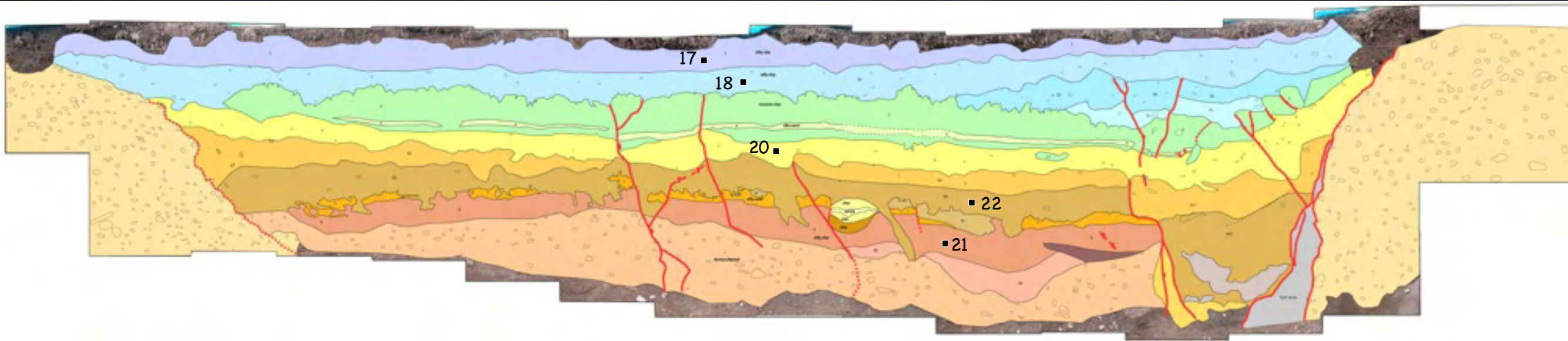
→ temps de retour des séismes



Ici ~ 400 ans

Paléosismologie, la chasse aux séismes anciens





3 to 4 séismes:

S0 après 946 ± 42 yr BP, peut être après 380 ± 70 yr BP

946 ± 42 yr BP < S1 et S2 < 2657 ± 49 yr BP

2657 ± 49 yr BP < S3 < 7610 ± 60 yr BP

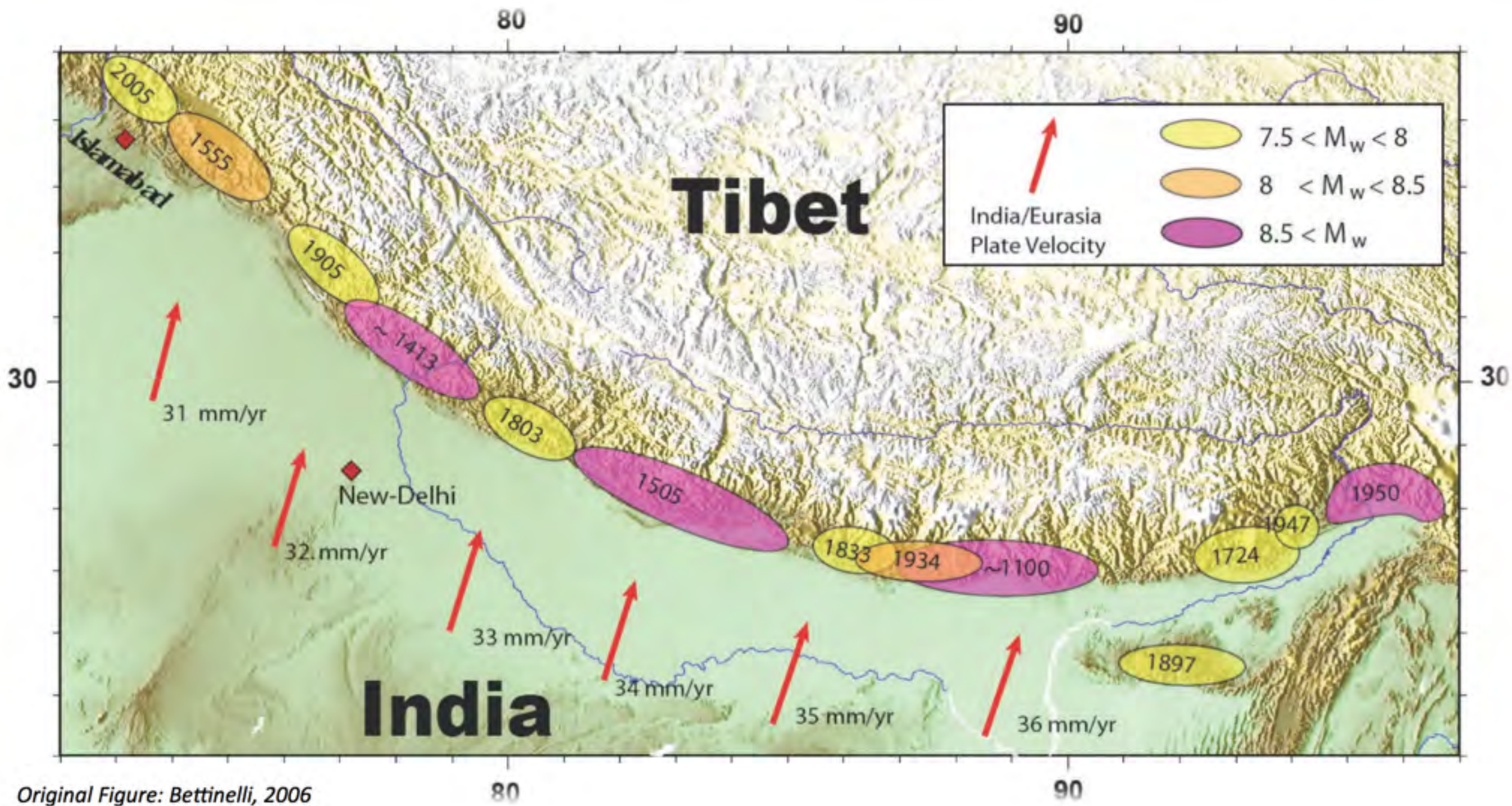
temps de recurence ~ 1000 yr, peu contraint

Dans bcp de cas on est donc capable de dire

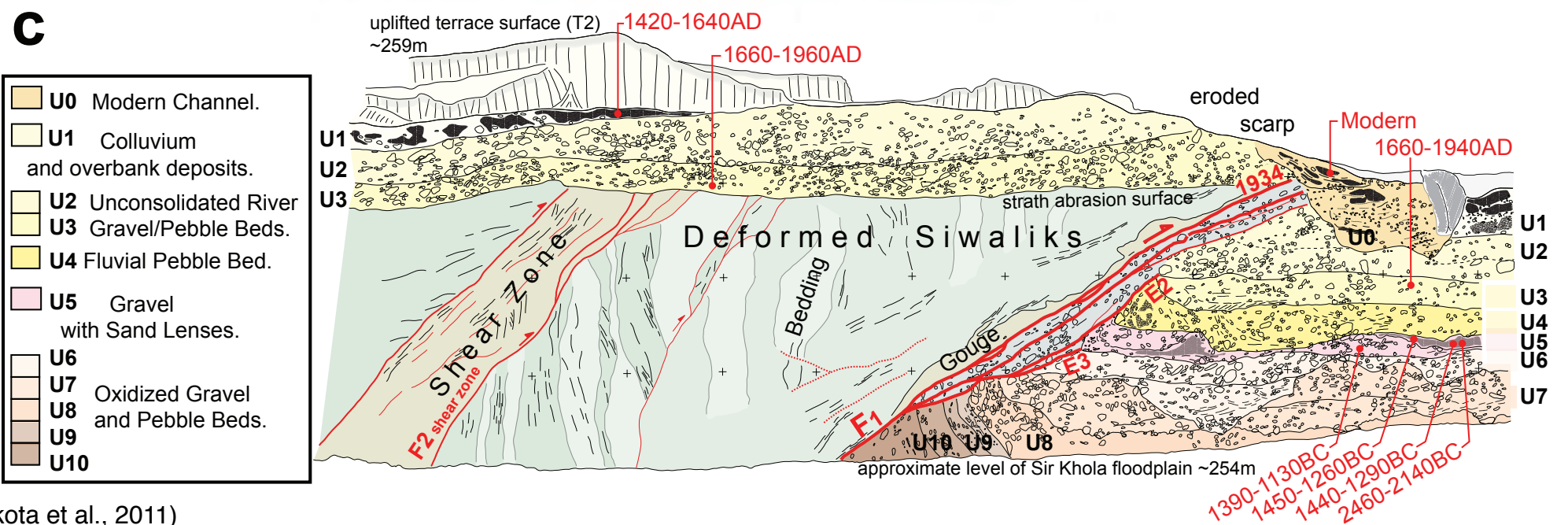
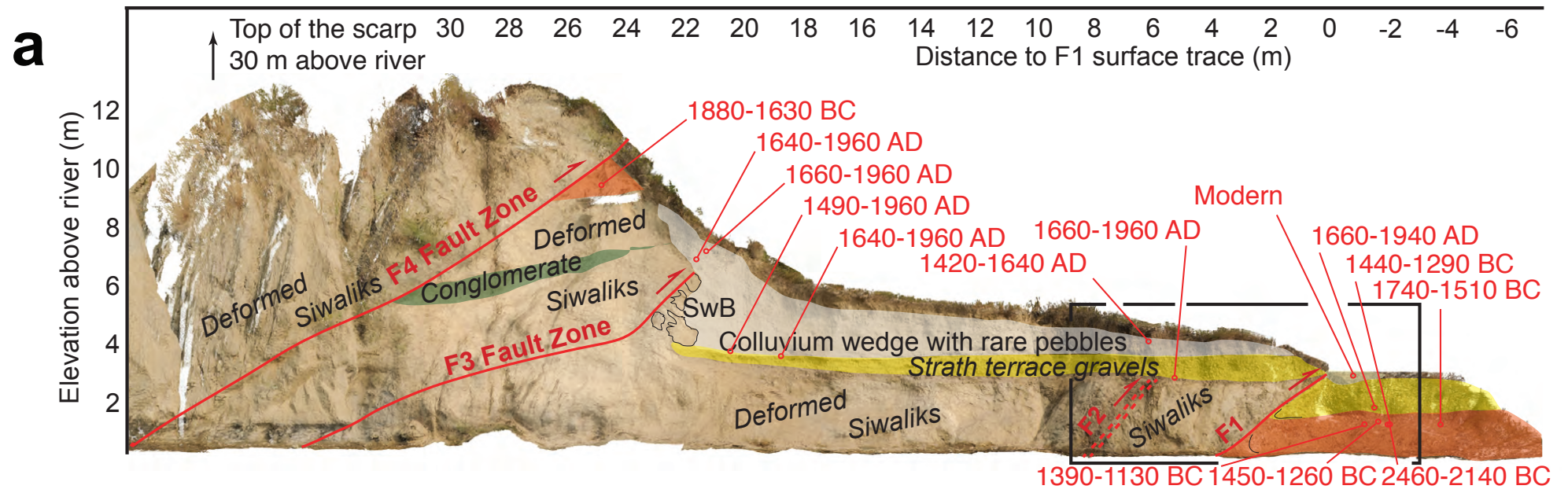
1/ quelles sont les zones à risque

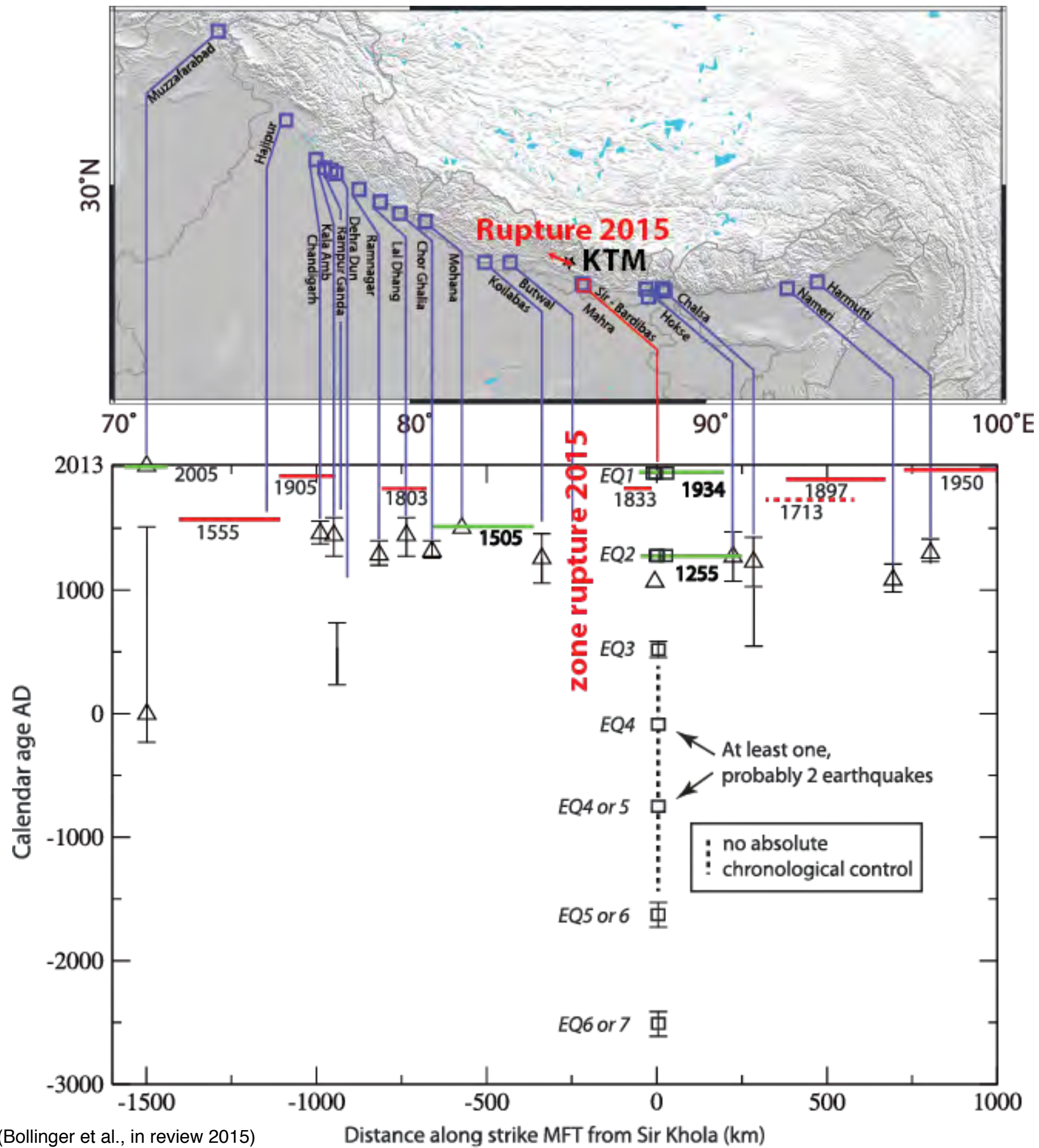
2/ à quelle vitesse se déroule la déformation

De façon moins systématique on peut faire des hypothèses sur le temps de retour des séismes

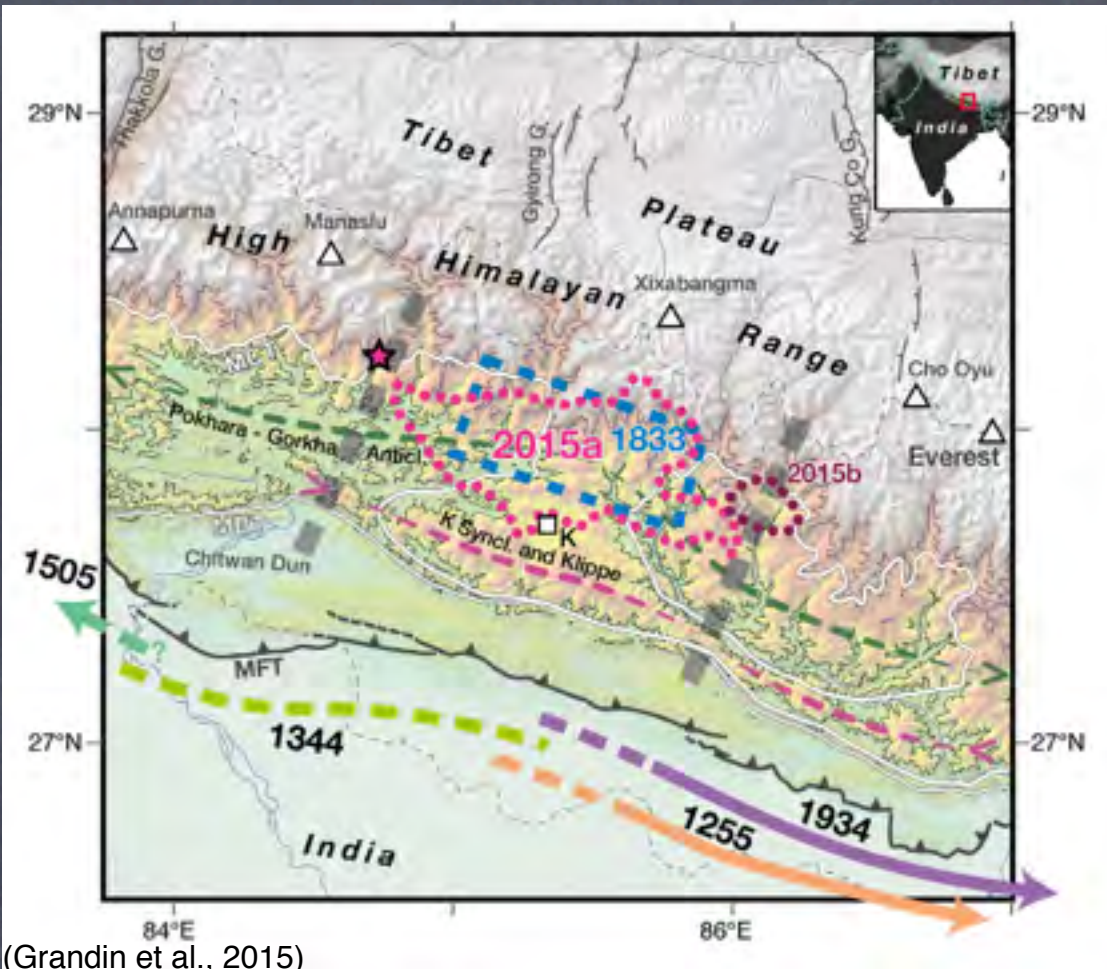


Original Figure: Bettinelli, 2006

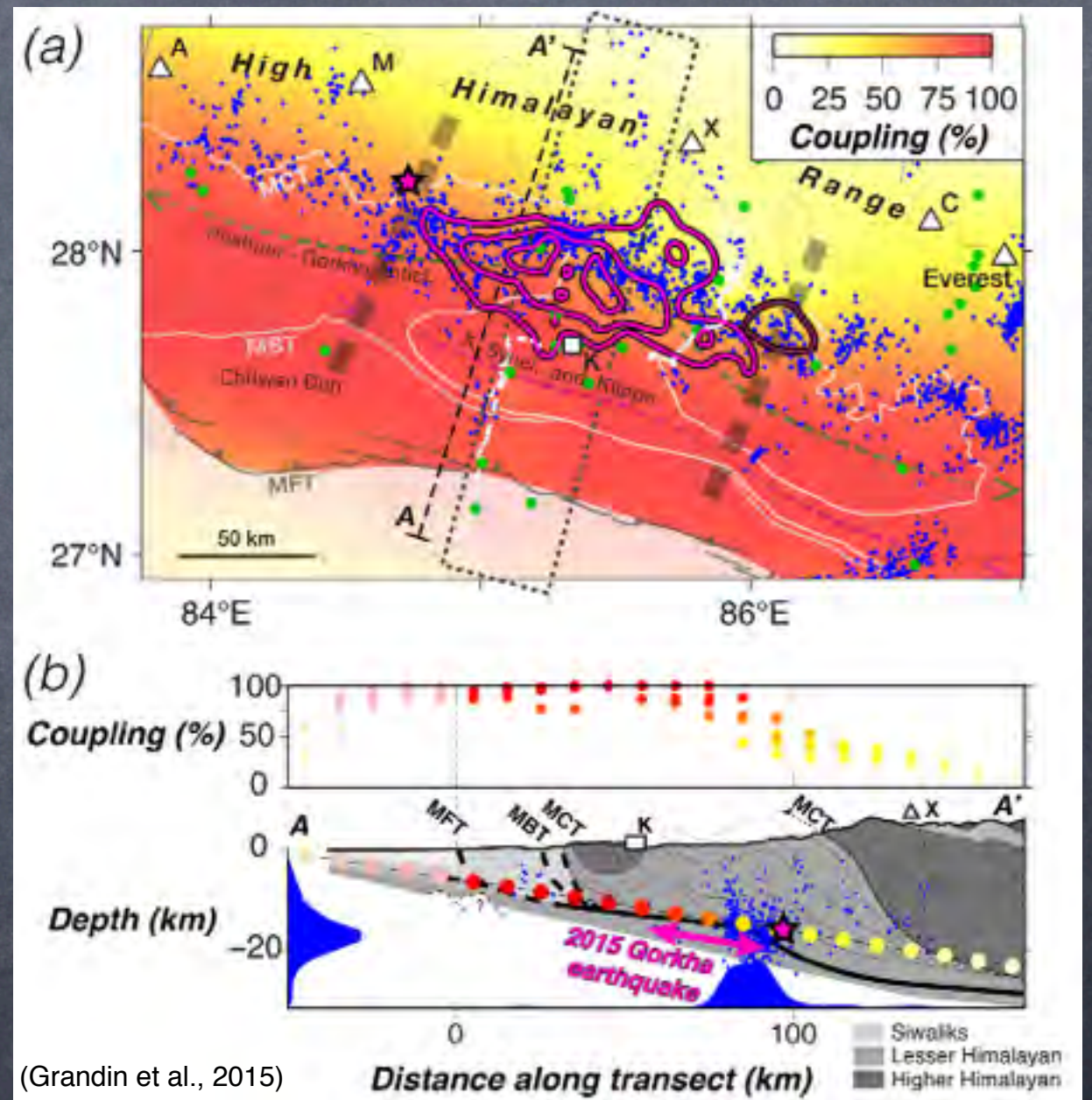




(Bollinger et al., in review 2015)



(Grandin et al., 2015)



(Grandin et al., 2015)

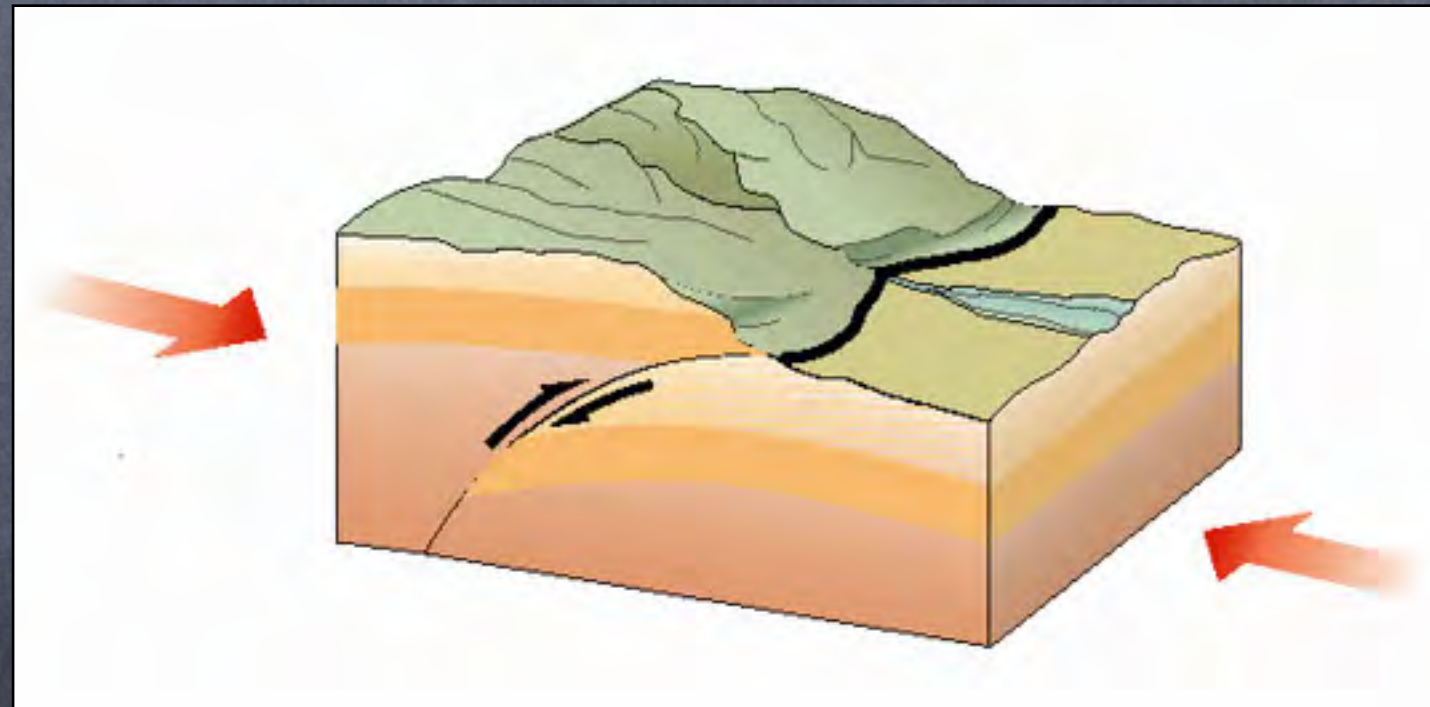
Les chevauchements, des séismes plus compliqués à appréhender

Deux séismes majeurs en Asie au cours de la dernière décennie :

- Le séisme du Pakistan en 2005, Mw7.6, ~ 70000 victimes
- Le séisme du Sichuan en 2008, Mw7.8, ~ 80000 victimes



La rupture d'un séisme en chevauchement est souvent plus segmentée, elle crée de la topographie!



Séisme du Pakistan

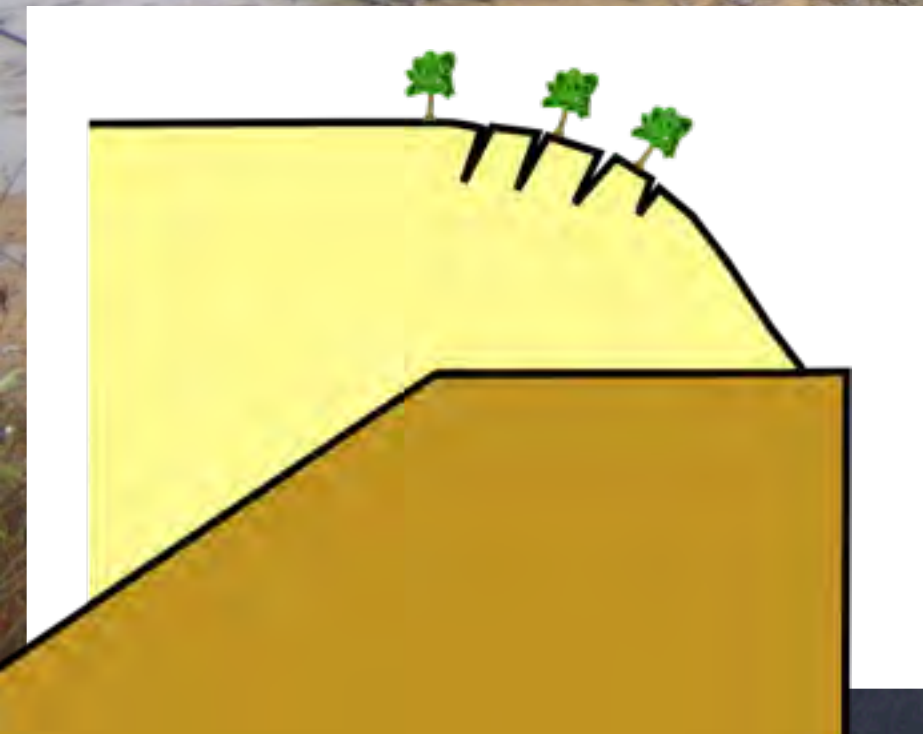
Terraces

Fault





"Folded" Trees







~ 5 m



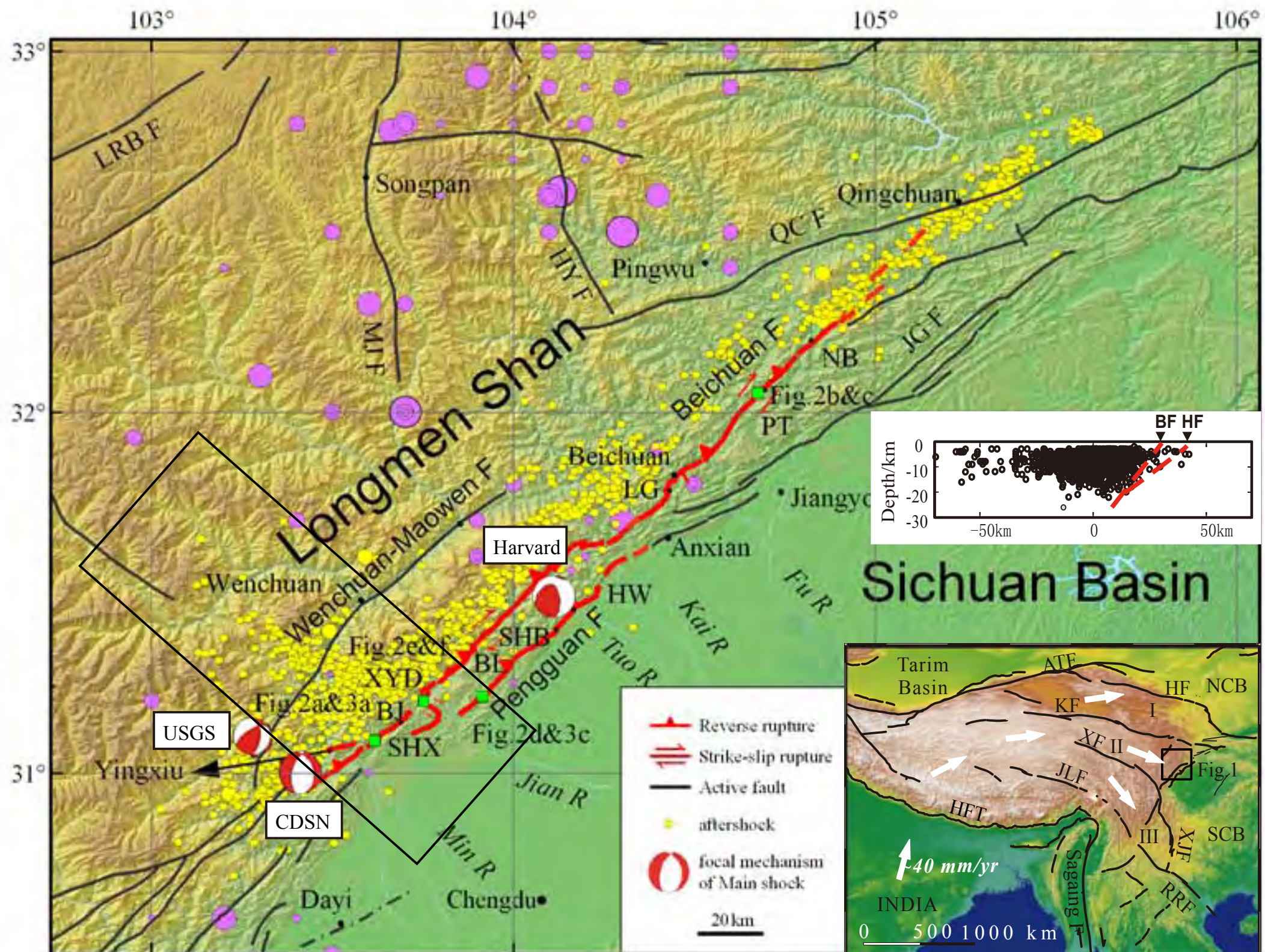


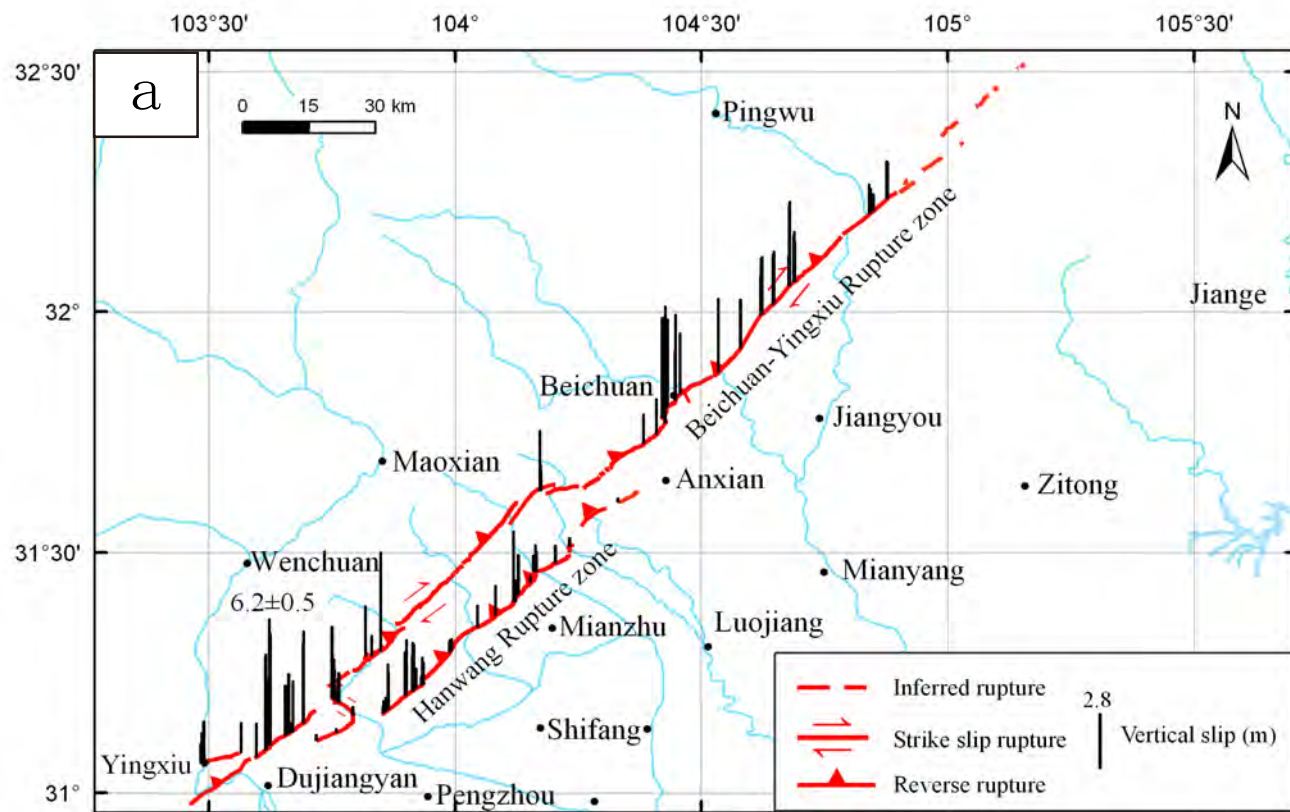
**Surface ruptures lors du
séisme du Sichuan en
2008**





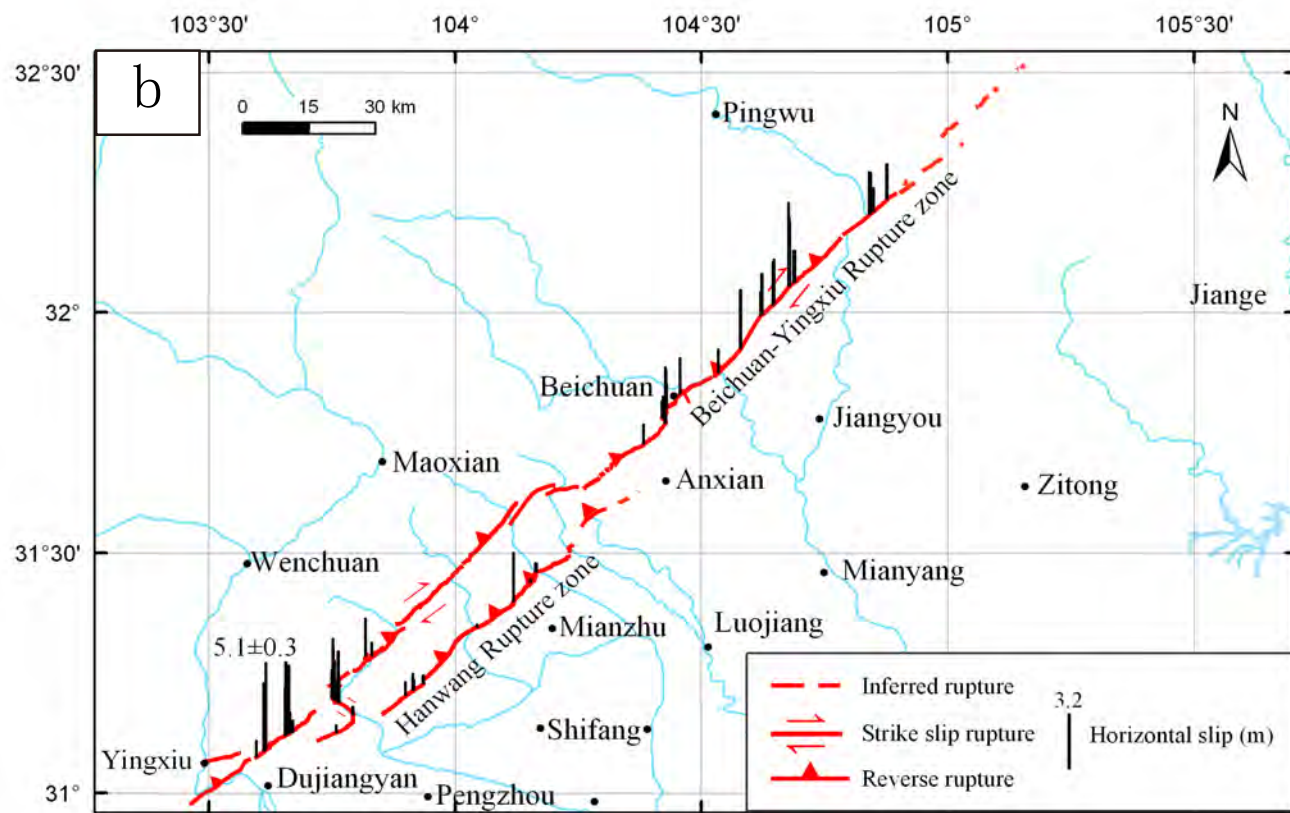
~1 month of aftershocks





Co-seismic offset

Déplacement vertical max ~6m



Déplacement horizontal max ~5m

L'Asie est l'une des zones tectoniques les plus actives de la planète

La déformation de la croûte terrestre est localisée le long de grandes failles, qui peuvent être identifiées si l'on s'en donne les moyens

Les taux de déformation sont mesurables sur plusieurs échelles de temps

Sur certains sites il est possible d'avoir une idée statistique du temps de retour des séismes

Il devrait donc être possible de réduire significativement le coût humain et économique associé aux grands séismes en Asie

Comment mesurer la déformation ?

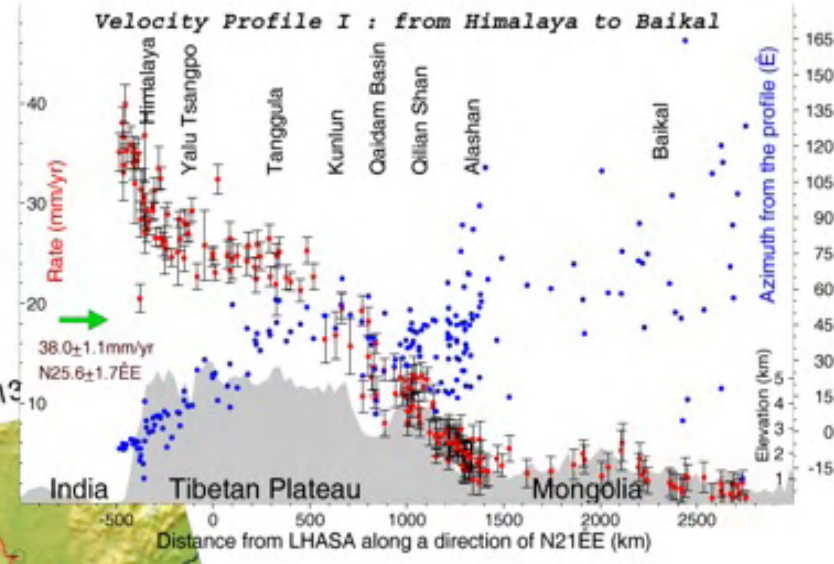
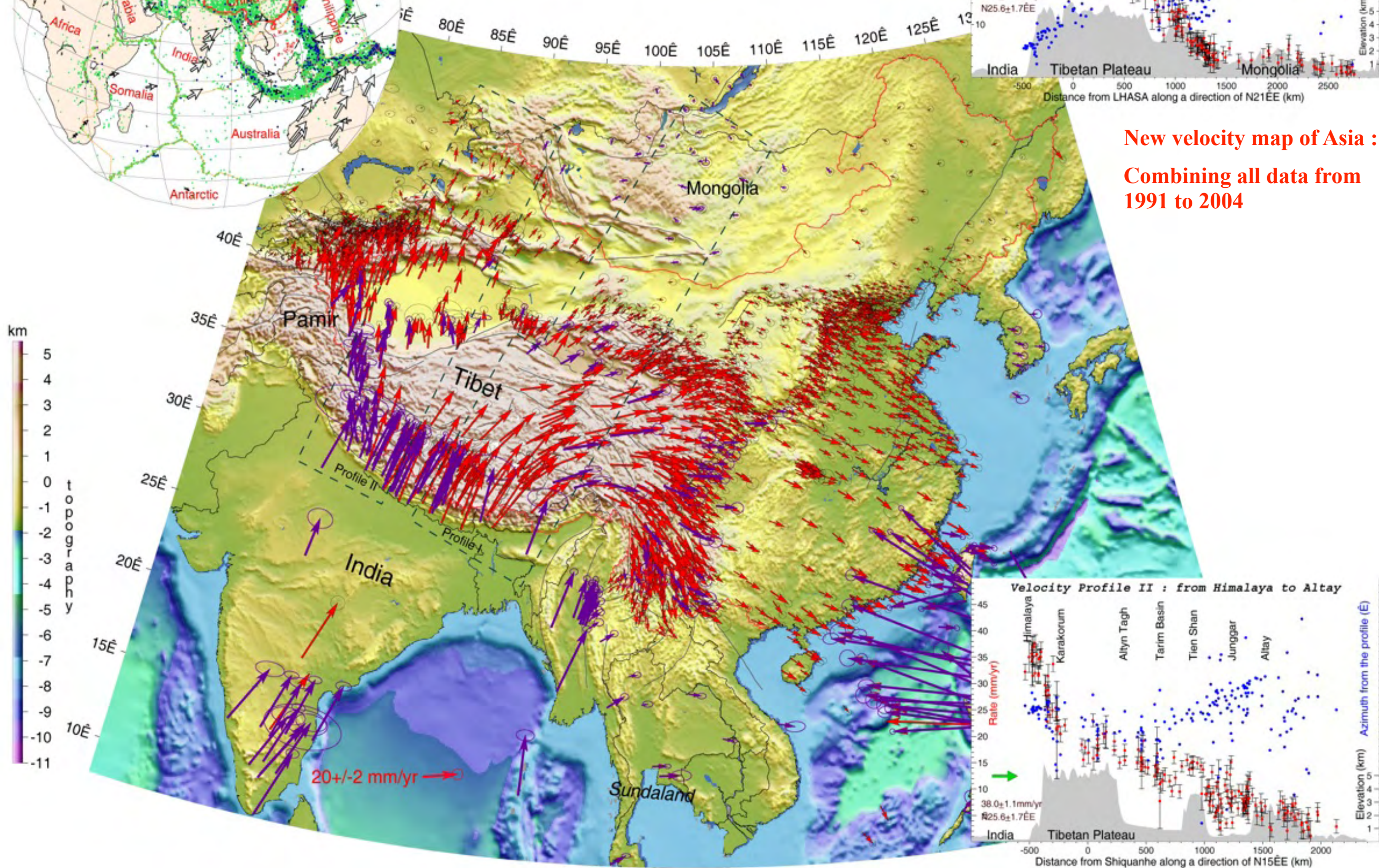
On peut mesurer la vitesse instantanée > GPS
(max. 20 ans de mesures)

Est-ce représentatif ?

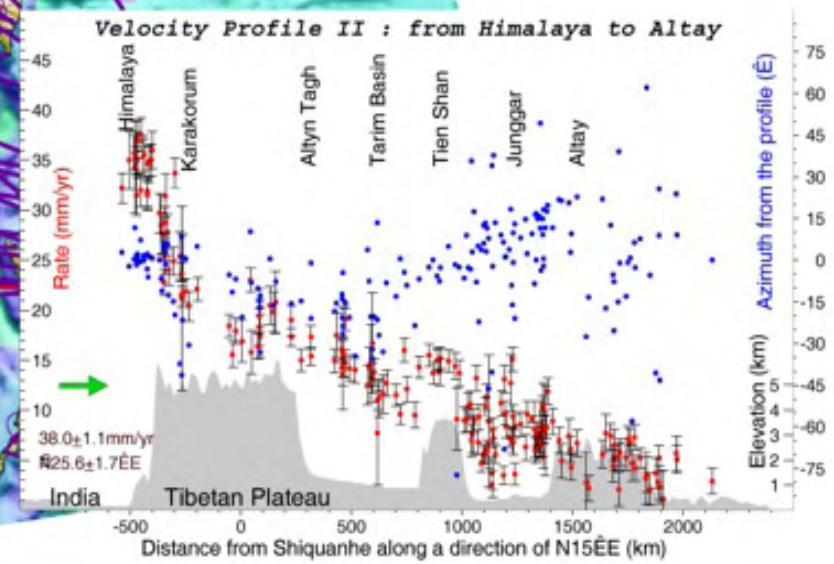
La déformation peut se mesurer



Asian Active Deformation with Respect to Stable Eurasia

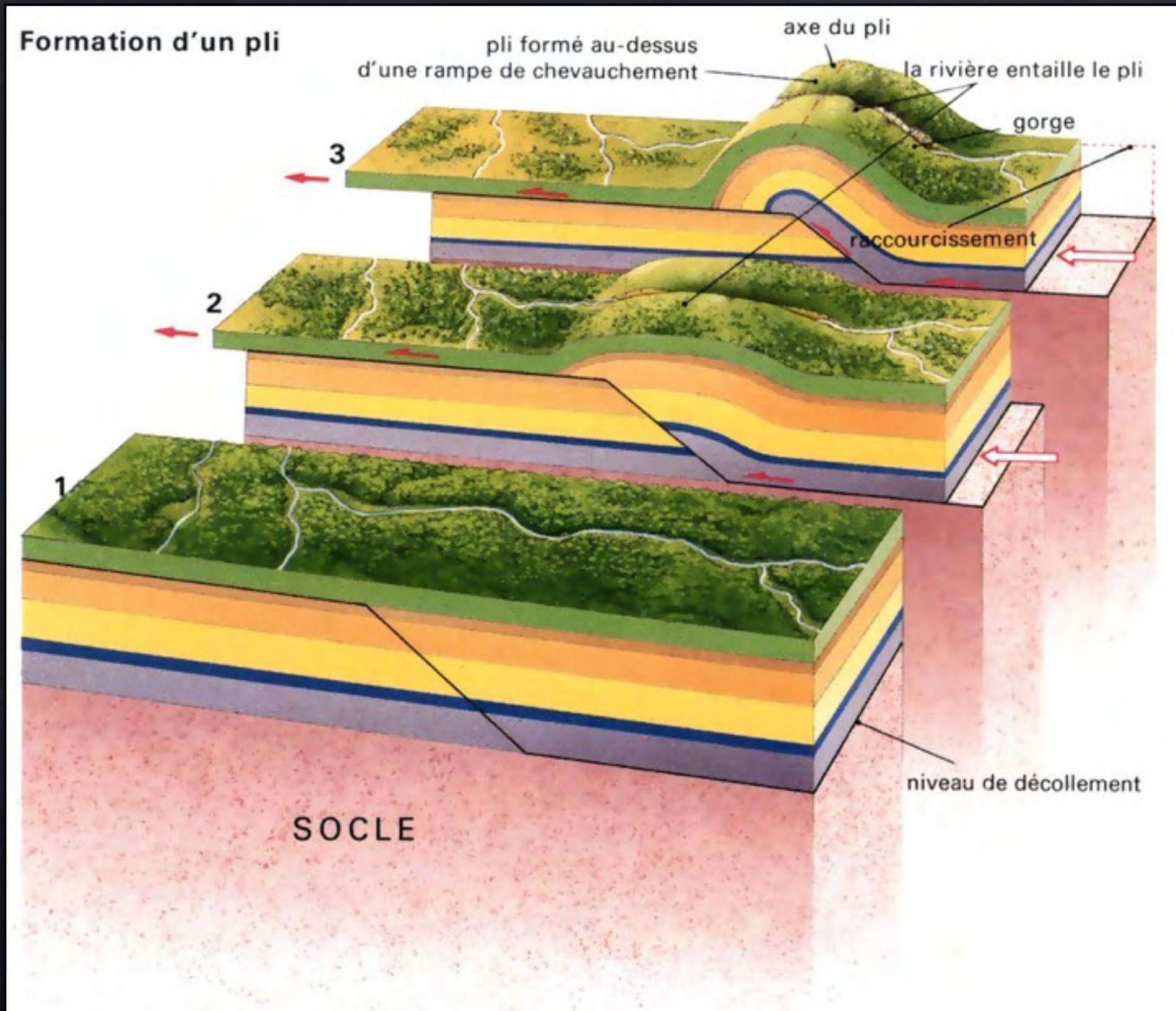


New velocity map of Asia :
Combining all data from
1991 to 2004



On peut mesurer la vitesse moyennée sur des
echelles de temps plus longues (x10 à x100 ka)
> la deformation Quaternaire

Devant c'est la collision! On déforme la croute



Au front de la Chaîne



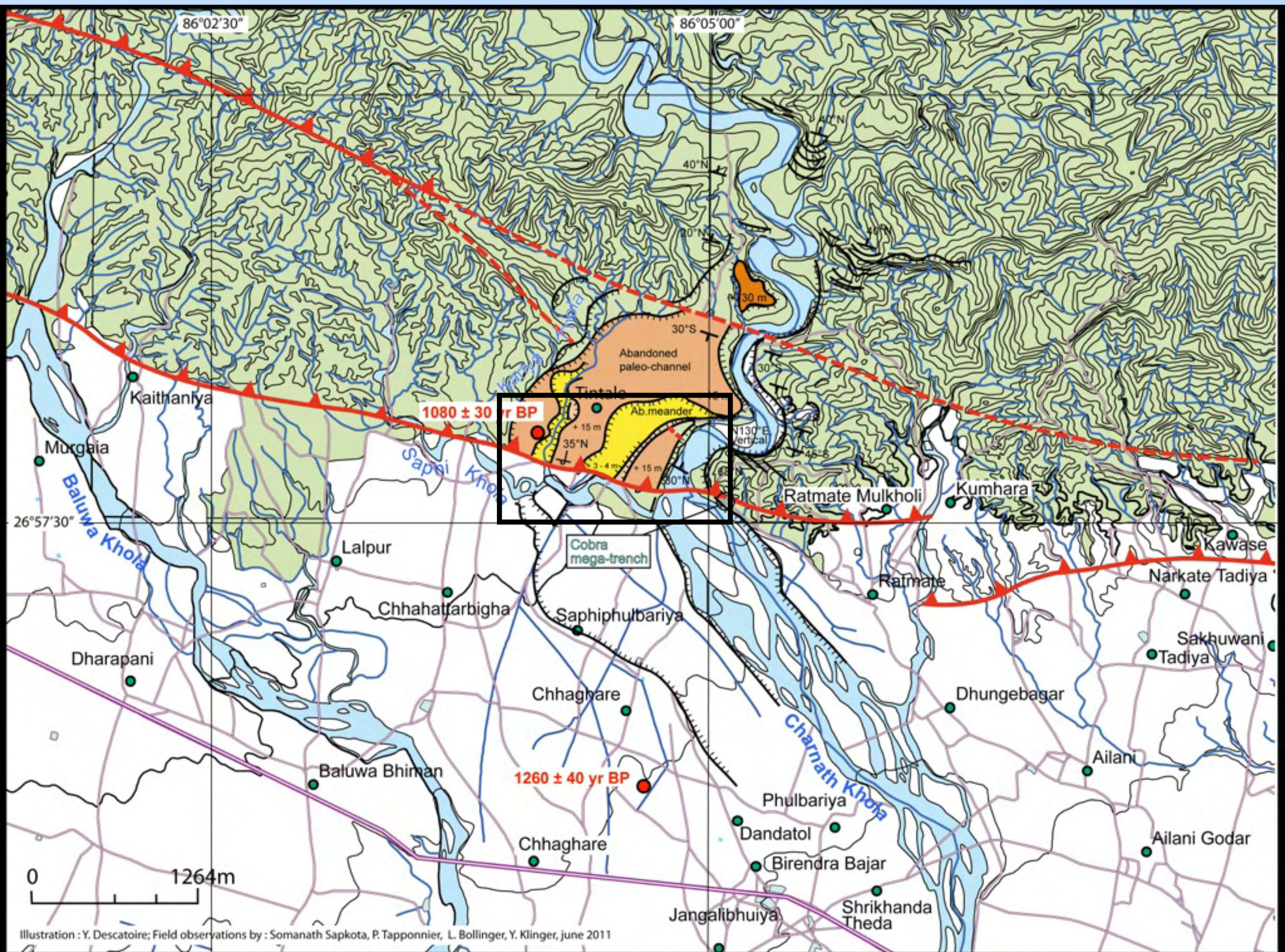


Illustration : Y. Descatoire; Field observations by : Somanath Sapkota, P. Tapponnier, L. Bollinger, Y. Klinger, june 2011



Helicopter View of Charnath





T4

T3

T2

T2

T3

T2

T4

Panchajal



Comment connaitre l'age de ces terrasses?
Datations au C14

~ 1000/1500 ans, +15m =>
~1cm/an



T4

T2

