

Les bassins d'avant-pays des chaînes de collision

Professeur Olivier LACOMBE



Institut des Sciences de la Terre
de Paris

- *Rappels sur les interactions entre phénomènes externes et internes au front des orogènes
 - *Rappels sur la flexure lithosphérique
 - *Qu'est-ce qu'un bassin d'avant-pays ?
- *Quelques exemples « classiques » : Alpes, Zagros, Taiwan, Pyrénées, Himalaya
 - *Et dans l'ancien ? l'exemple de l'Hercynien
- *Éléments de modélisation des bassins d'avant-pays

**BASSIN
FLEXURAL**

PRISME

dépôt

érosion

Croûte continentale

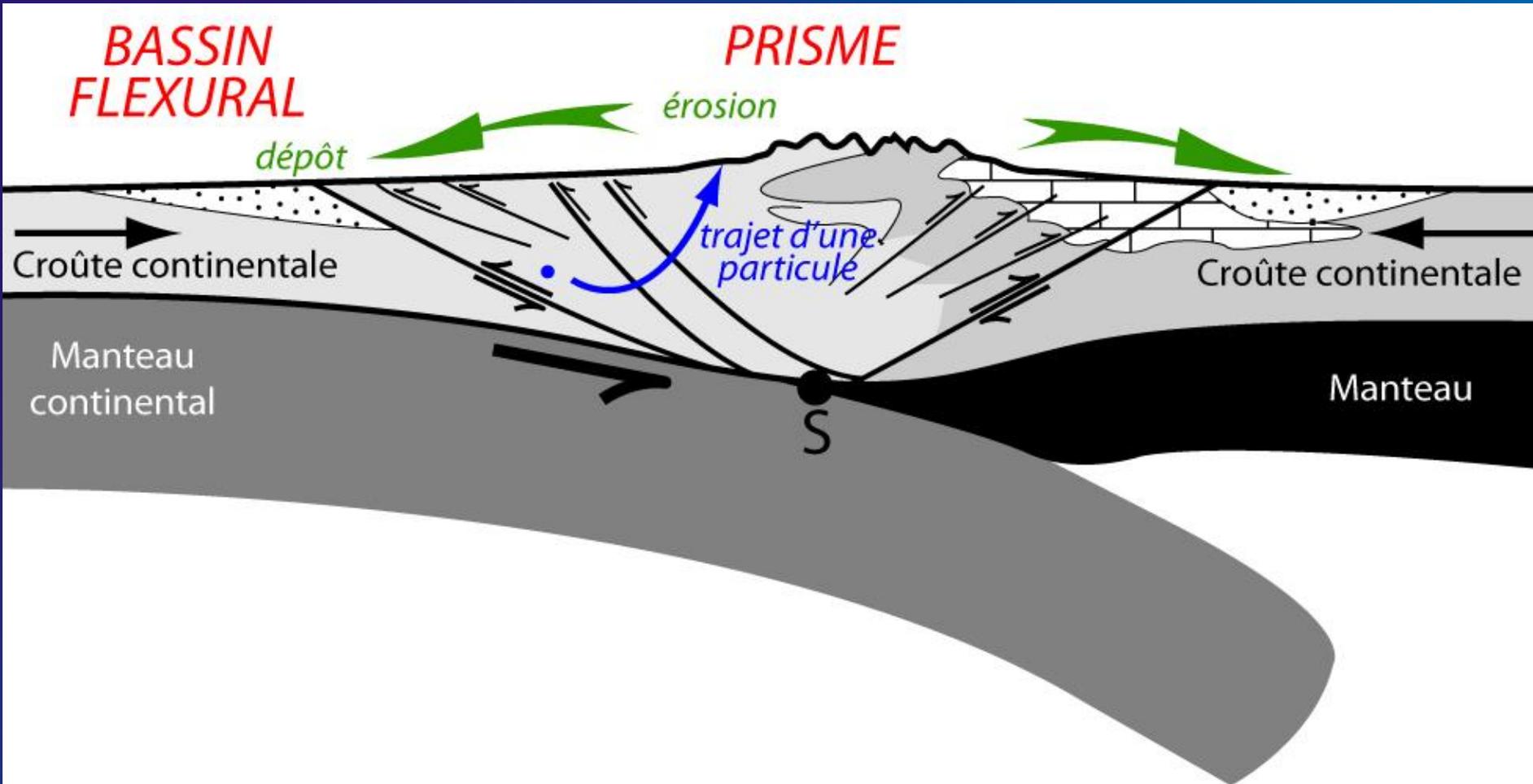
Croûte continentale

Manteau
continental

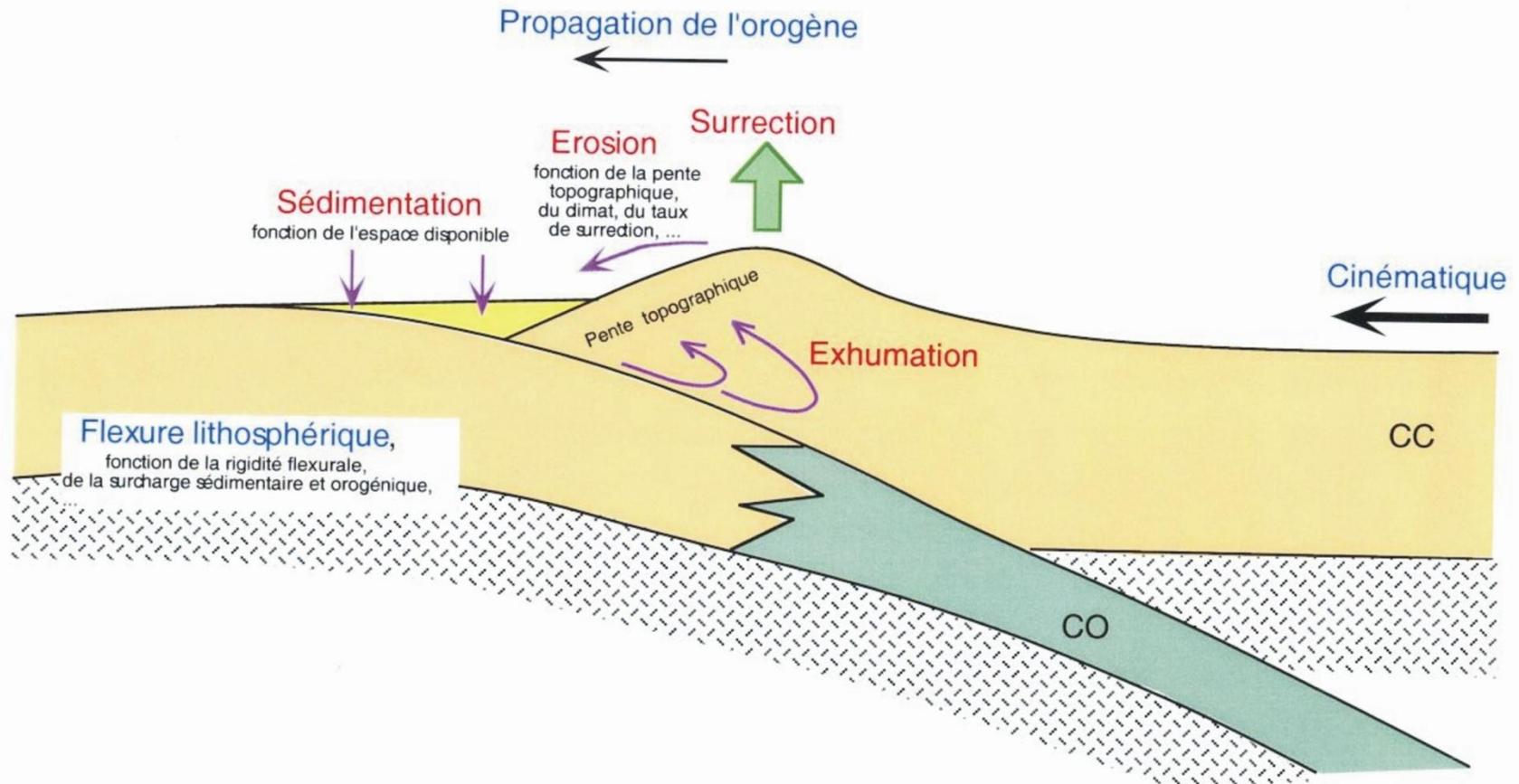
Manteau

trajet d'une
particule

S

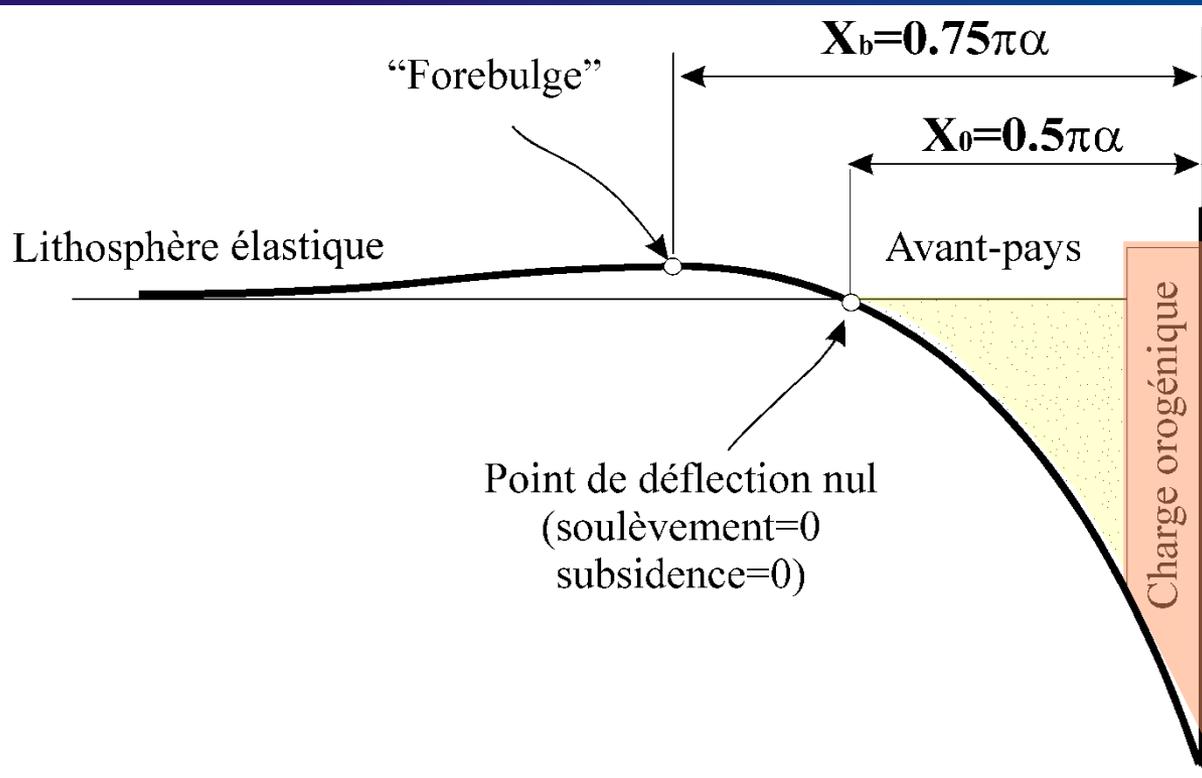


Les interactions au front des orogènes



Rappels sur la flexure lithosphérique

Déflexion d'une lithosphère élastique (continentale ou océanique)



Rigidité et épaisseur
élastique équivalente
d'une lithosphère

Paramètre flexural

$$\alpha = \left(\frac{4D}{g(\rho_m - \rho_{w/sed})} \right)^{1/4}$$

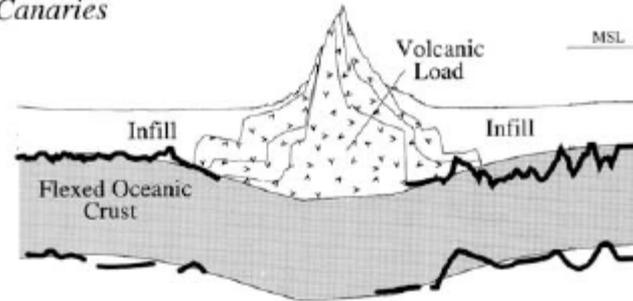
$$D = \frac{ET_e^3}{12(1-\nu^2)}$$

T_e (km)
 D (Nm)

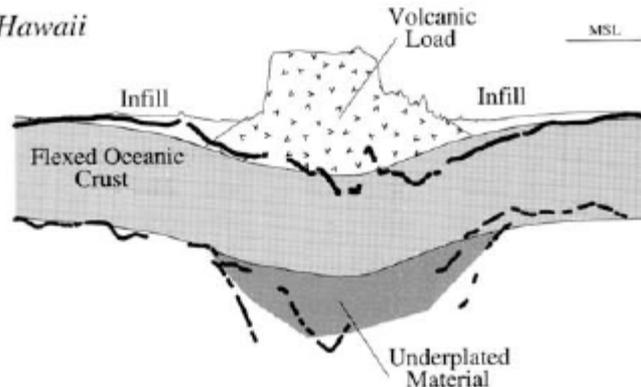
La subsidence est liée à la compensation isostatique régionale (flexurale) et non locale (Airy) de la surcharge tectonique et sédimentaire

4.3 Seamounts and Oceanic Islands

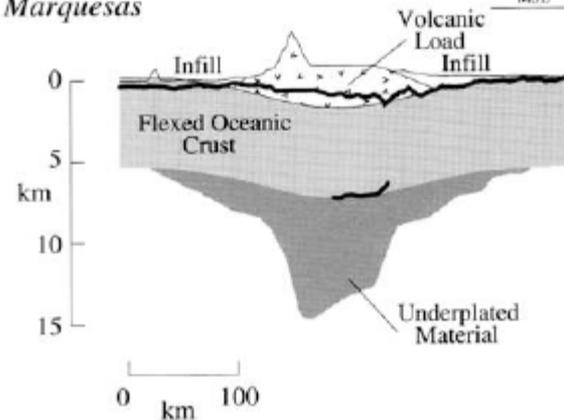
Canaries



Hawaii



Marquesas

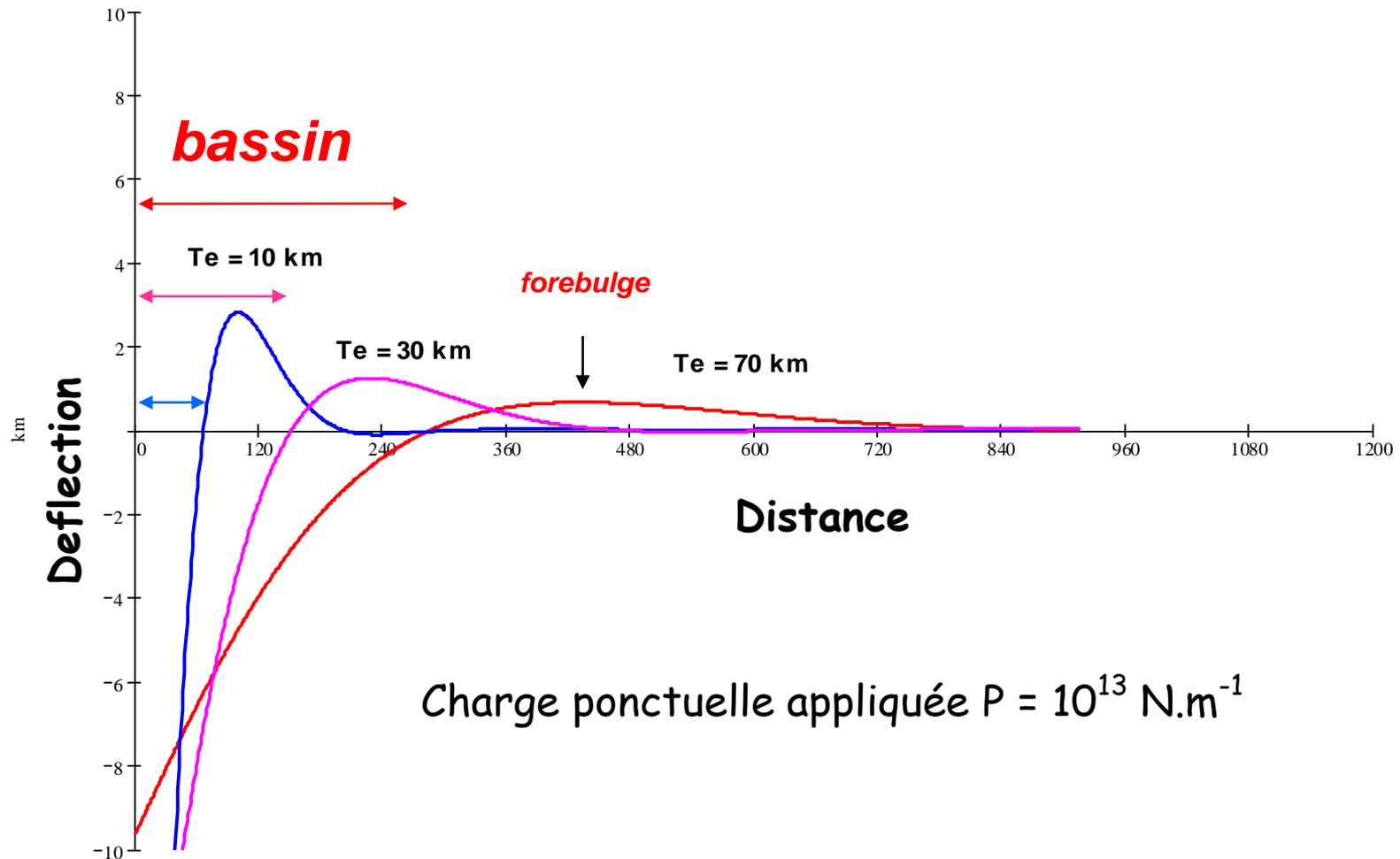


Plaque continue

Les « Seamounts »

(D'après Watts)

Plaque cassée



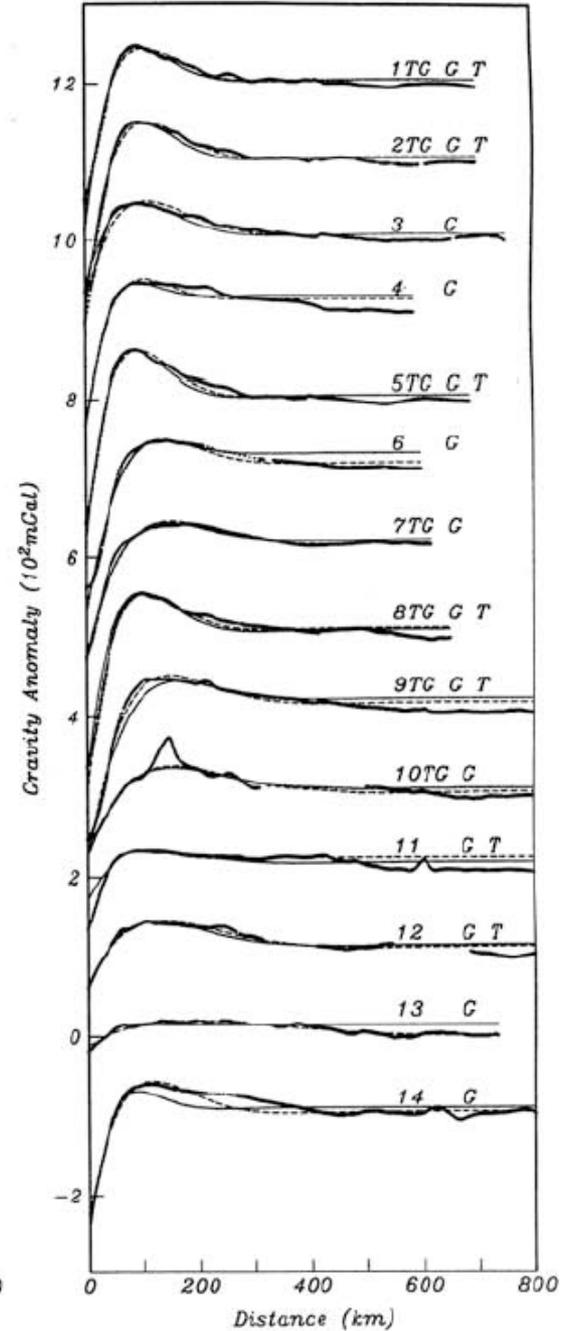
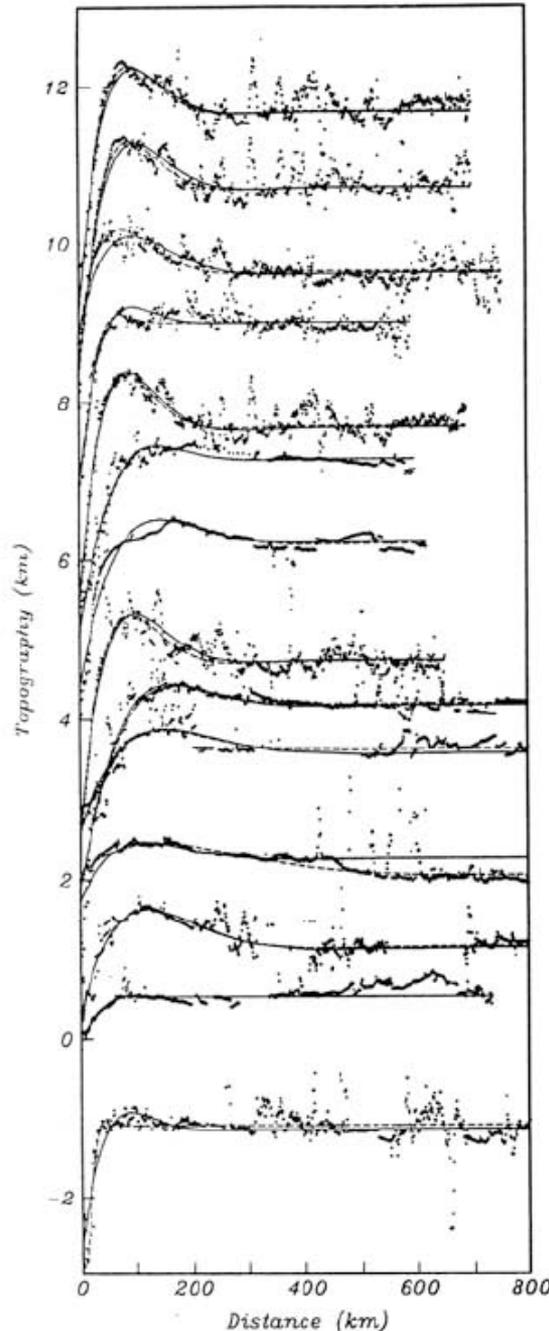
Charge ponctuelle appliquée $P = 10^{13} \text{ N.m}^{-1}$

Plaque cassée

Les fosses
« foredeeps »
des zones
de subduction

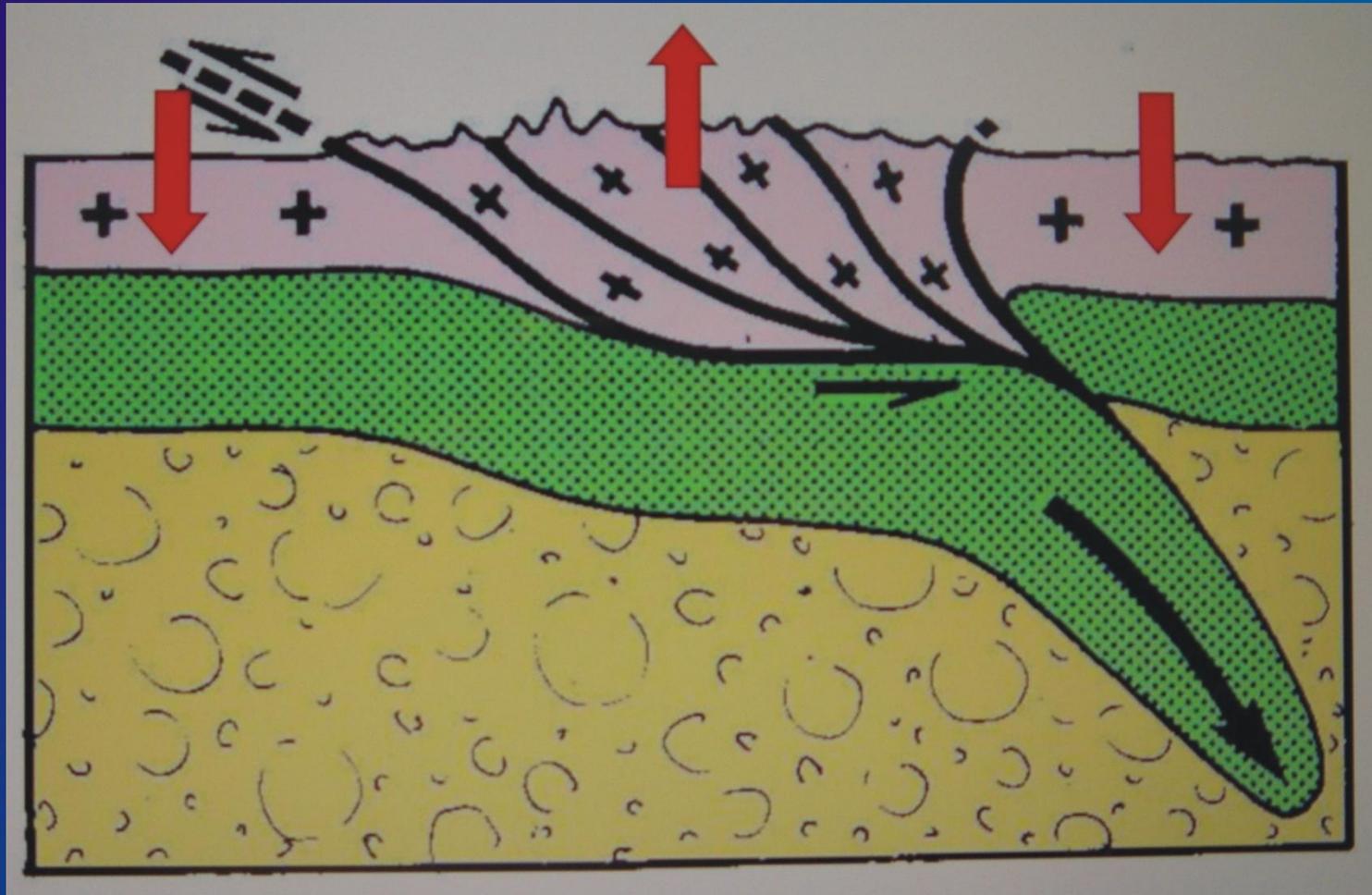
et les « forelands »
des zones
de collision

(D'après Watts)



Qu'est-ce qu'un bassin d'avant-pays ?

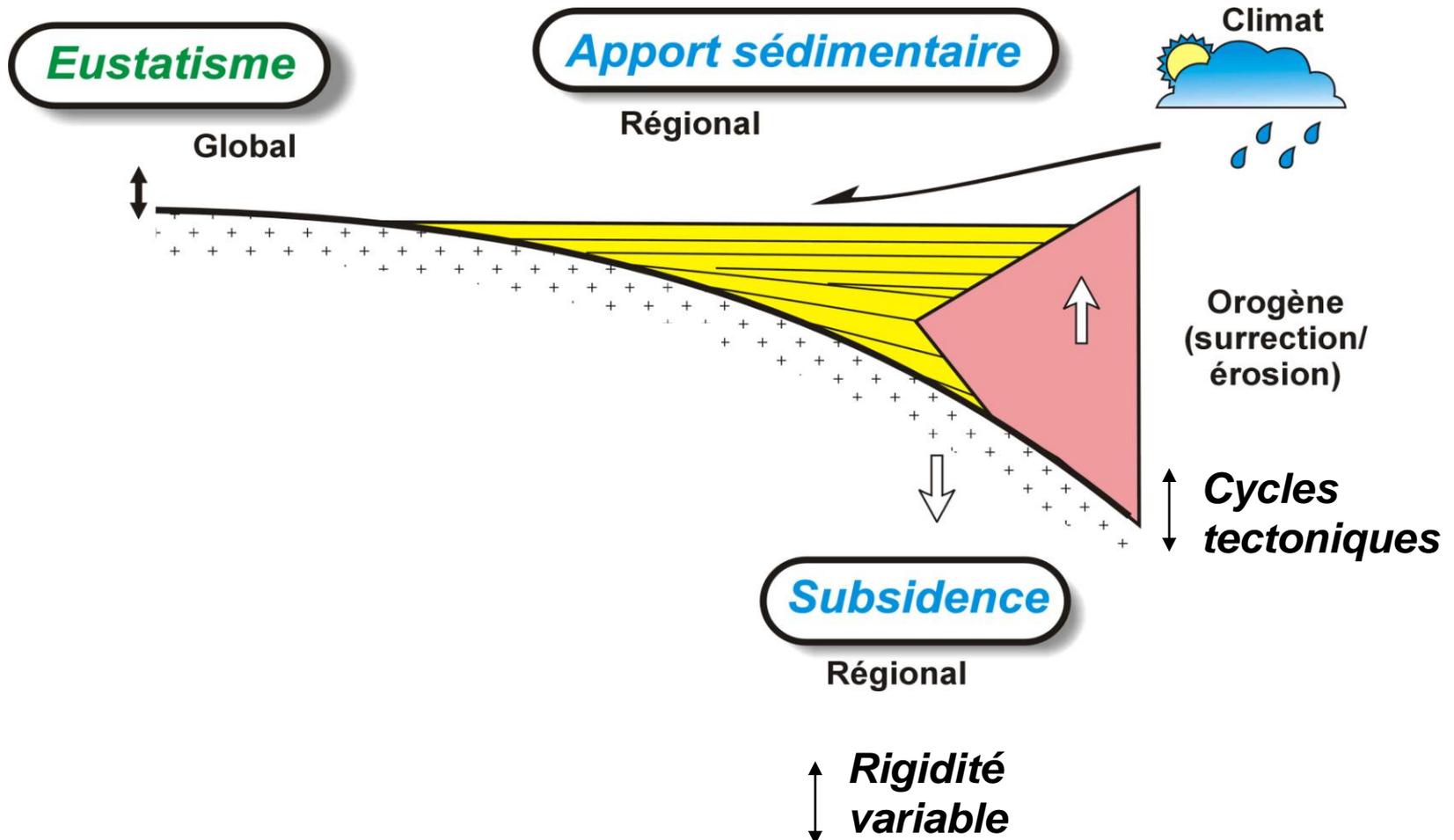
Mouvements verticaux associés aux chaînes de montagnes

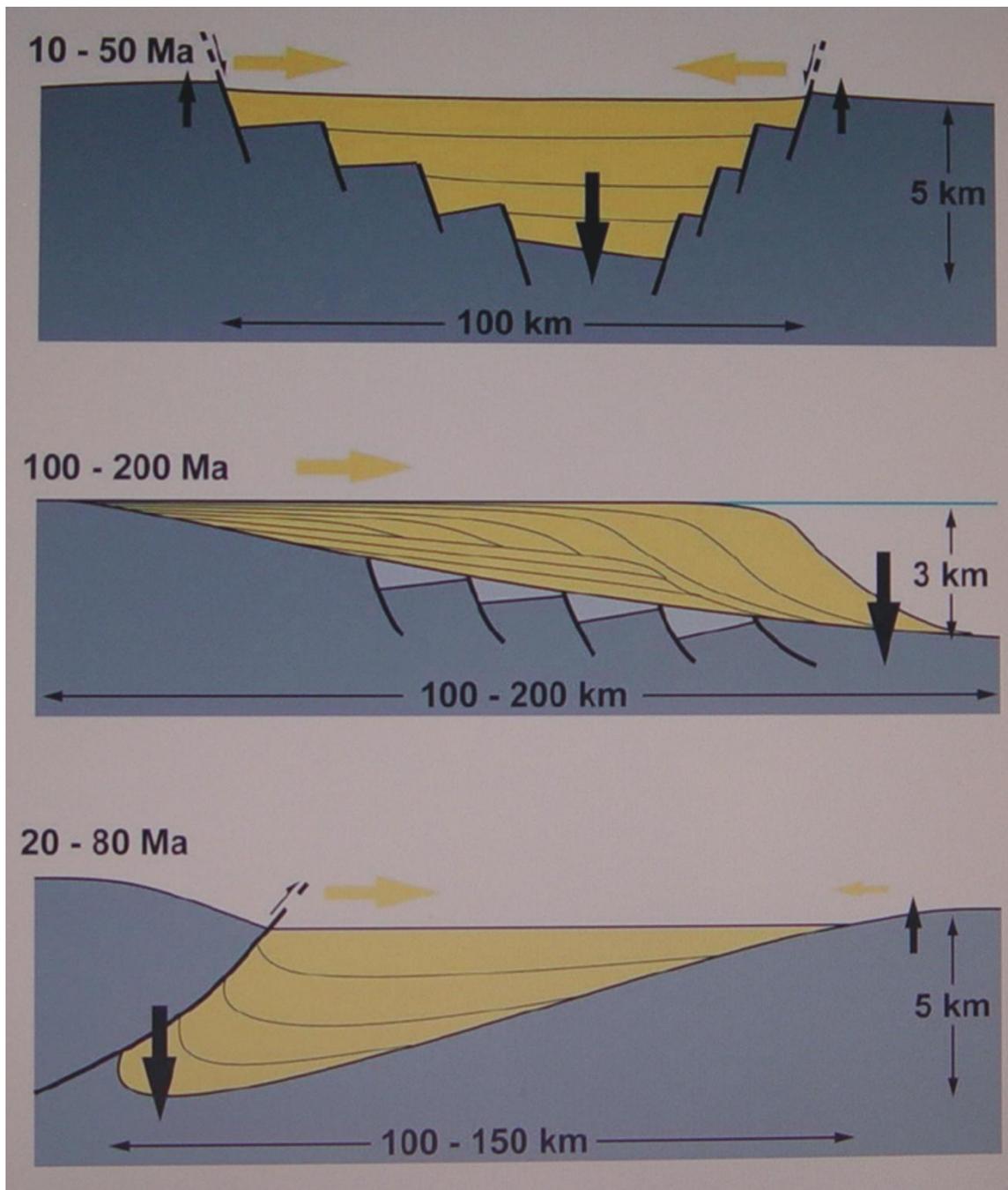


Moteur de la subsidence :

- Poids de la topographie/nappes orogéniques
- Mais pas seulement : « charges cachées » (hidden loads)
panneau océanique plongeant, ophiolites enfouies, ...

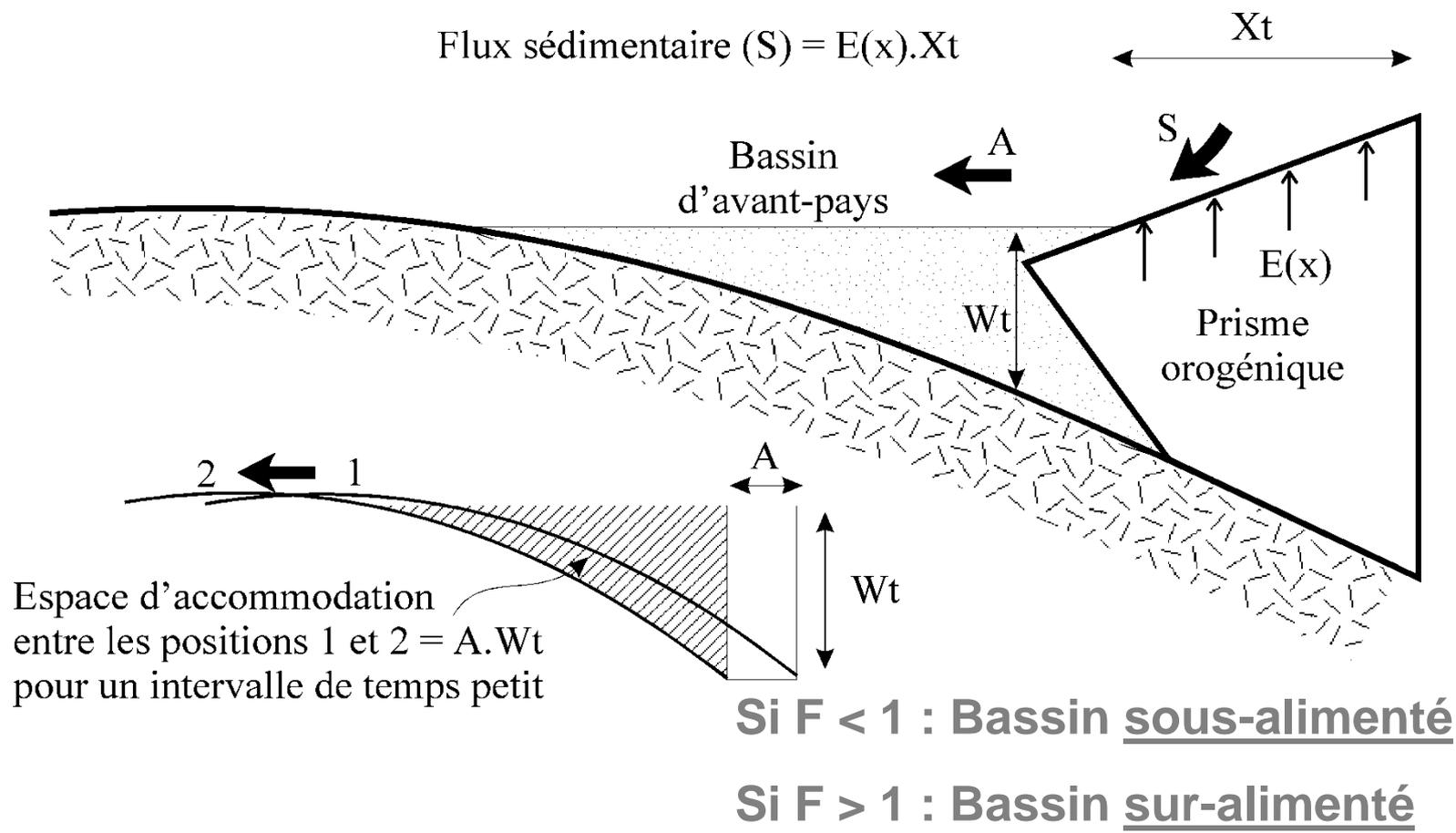
L'enregistrement sédimentaire est le résultat de l'interaction de facteurs tectoniques et eustatiques



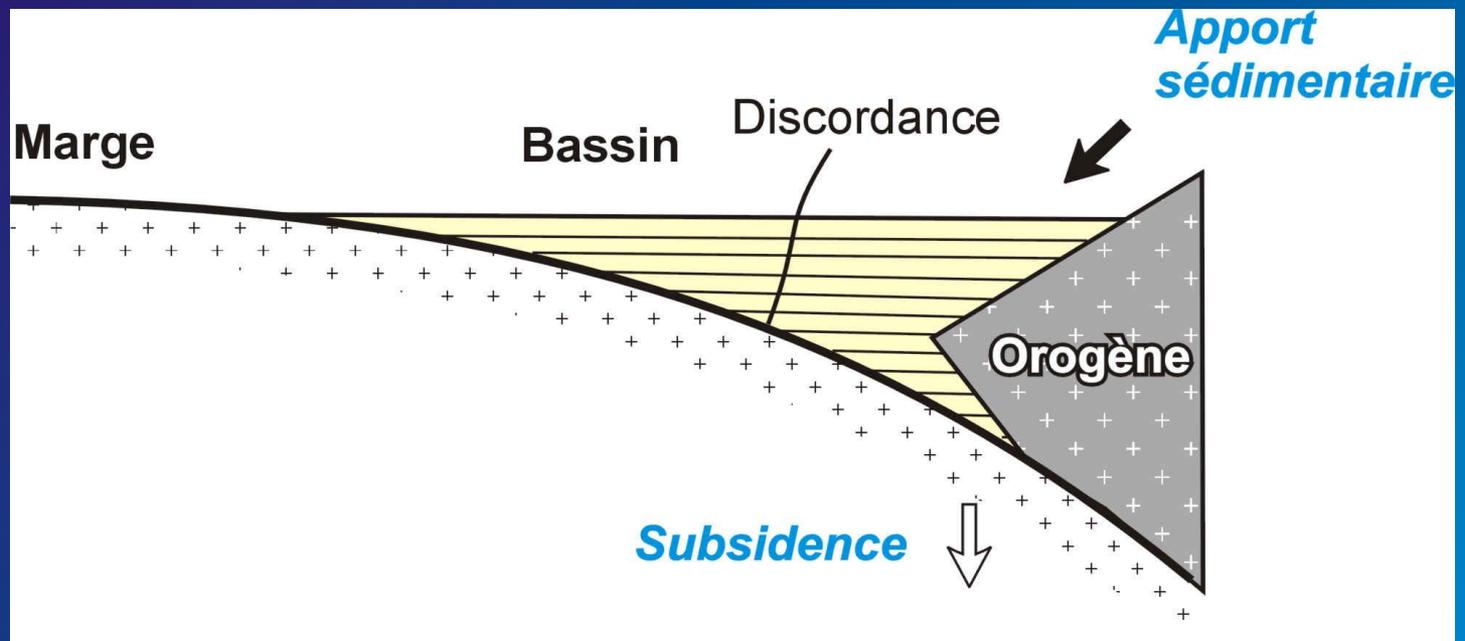


(d'après L. Barrier)

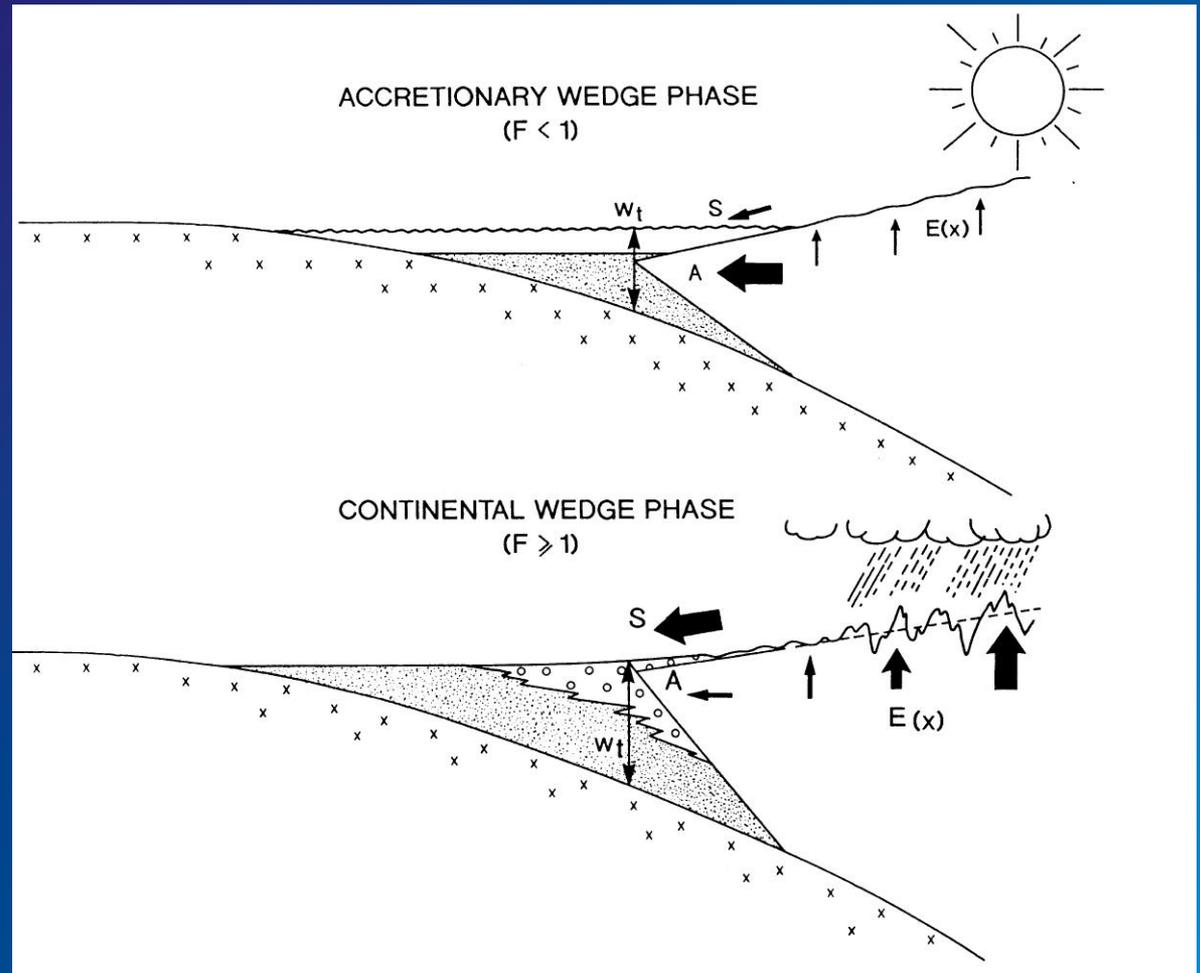
$F = \text{flux sédimentaire} / \text{espace disponible}$



Remplissage sédimentaire discordant en onlaps sur la marge

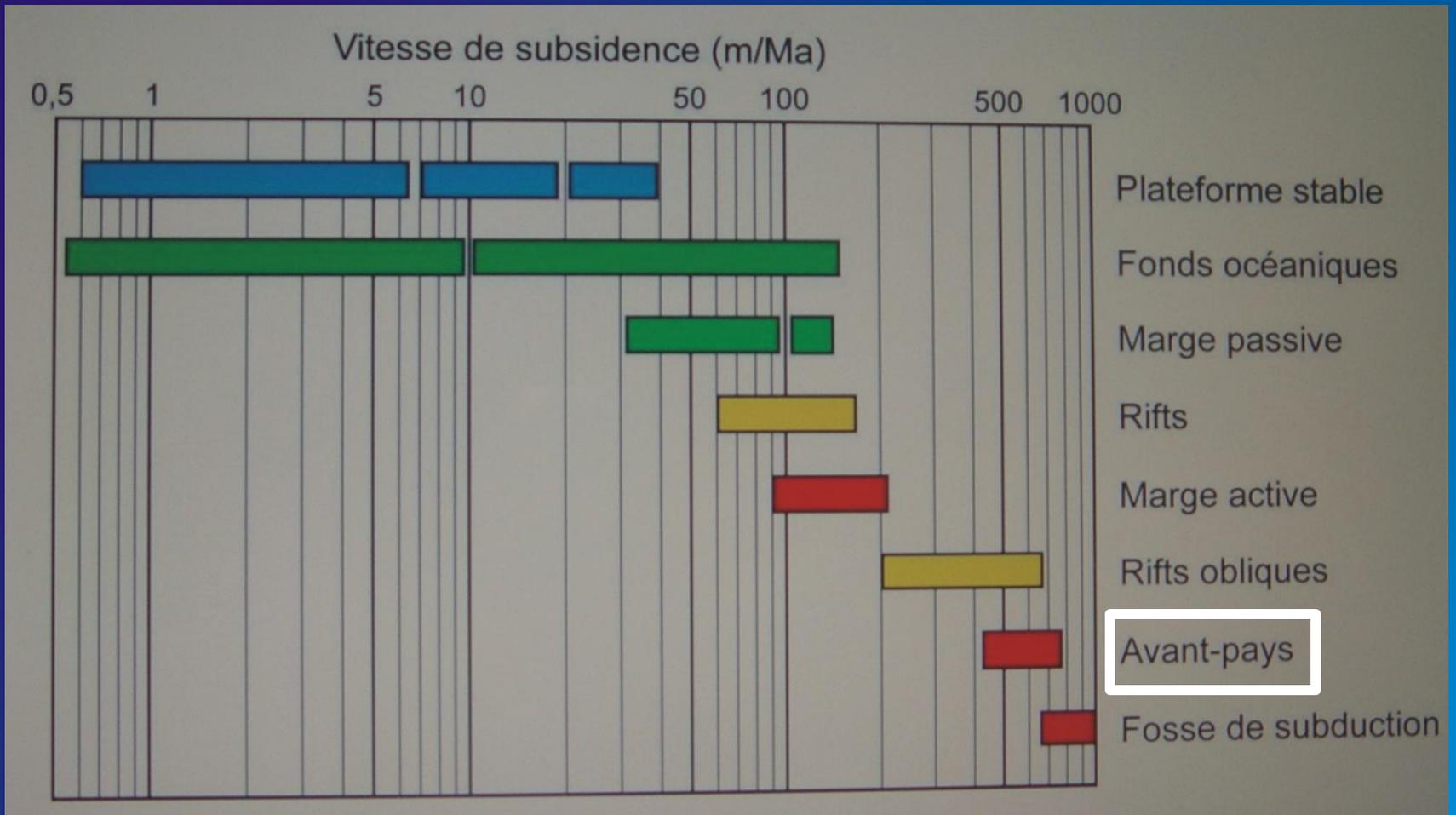


Bassin sous-alimenté
stade « océanique »
 $F < 1$



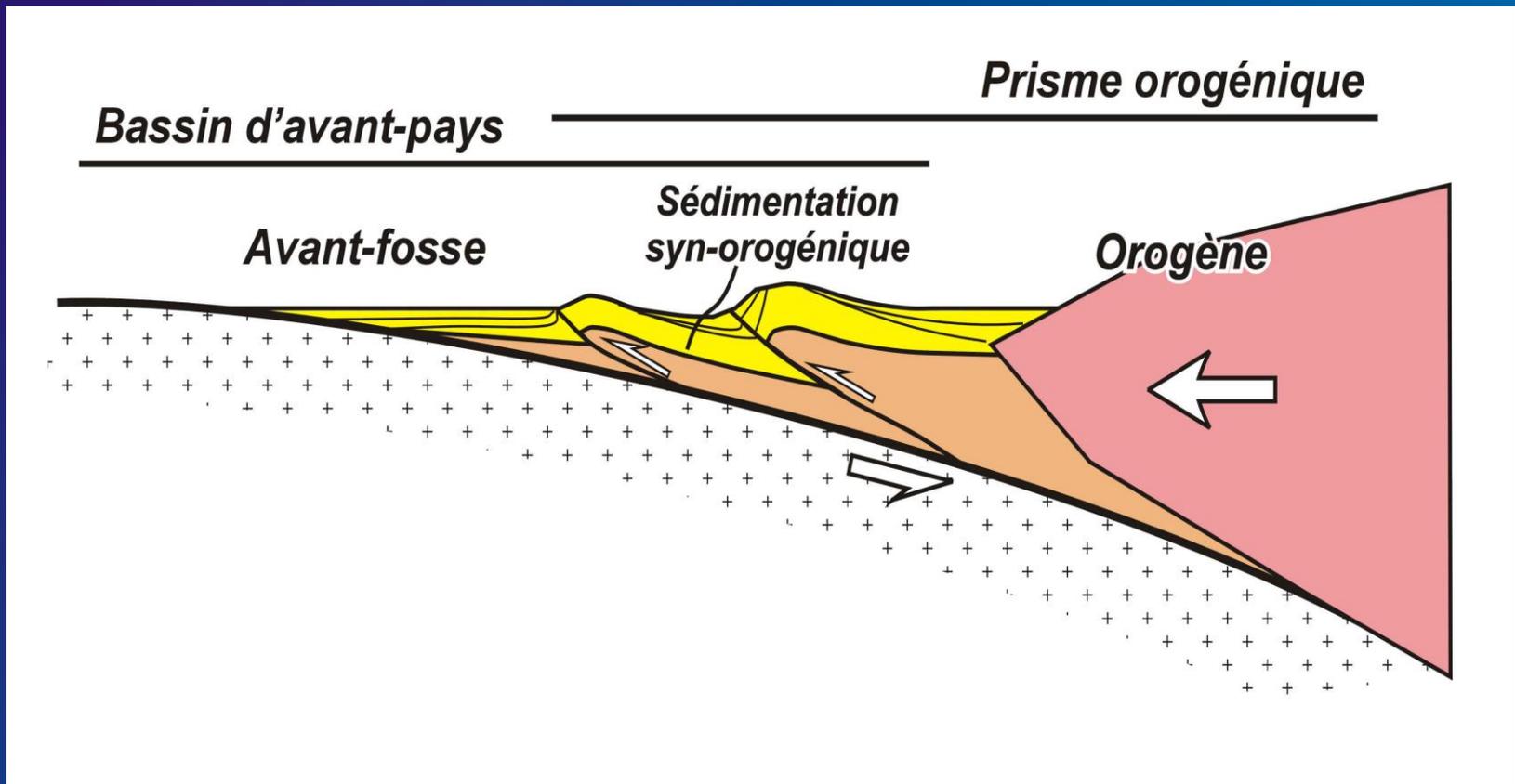
Bassin sur-alimenté
stade « continental »
 $F > 1$

(d'après Sinclair)



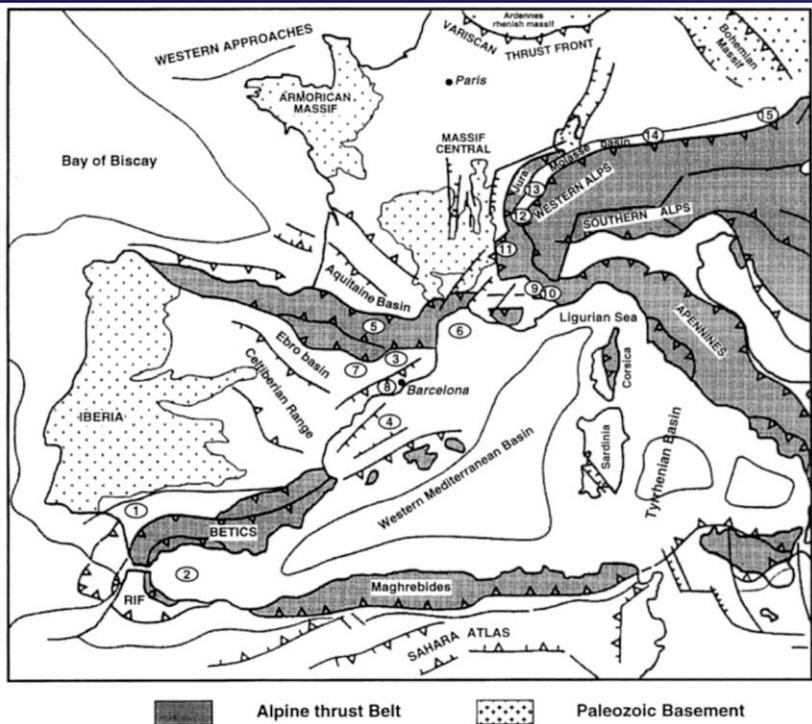
(d'après L. Barrier)

Le système chaîne plissée-bassin d'avant-pays des orogènes



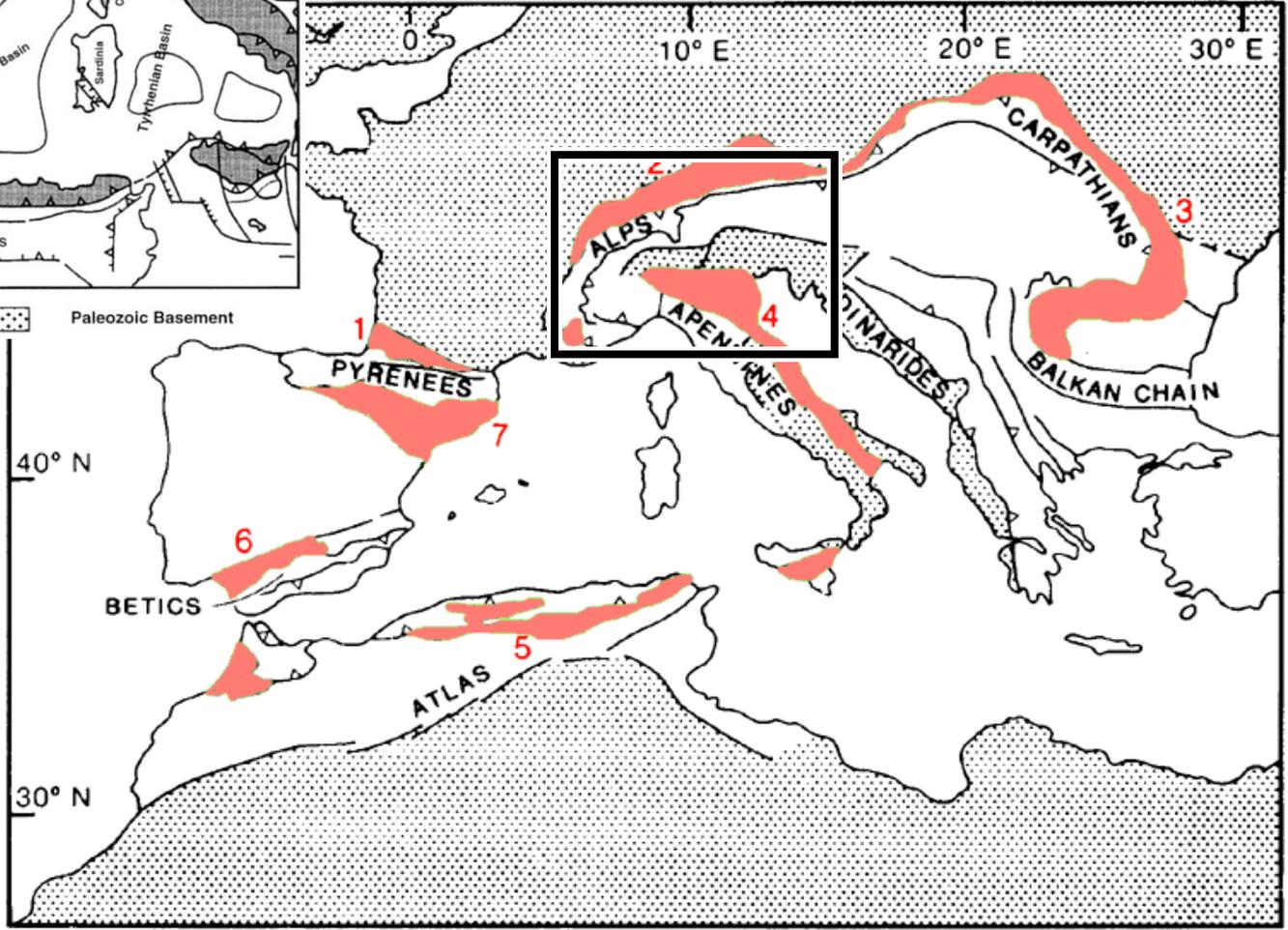
Le bassin d'avant-pays alpin

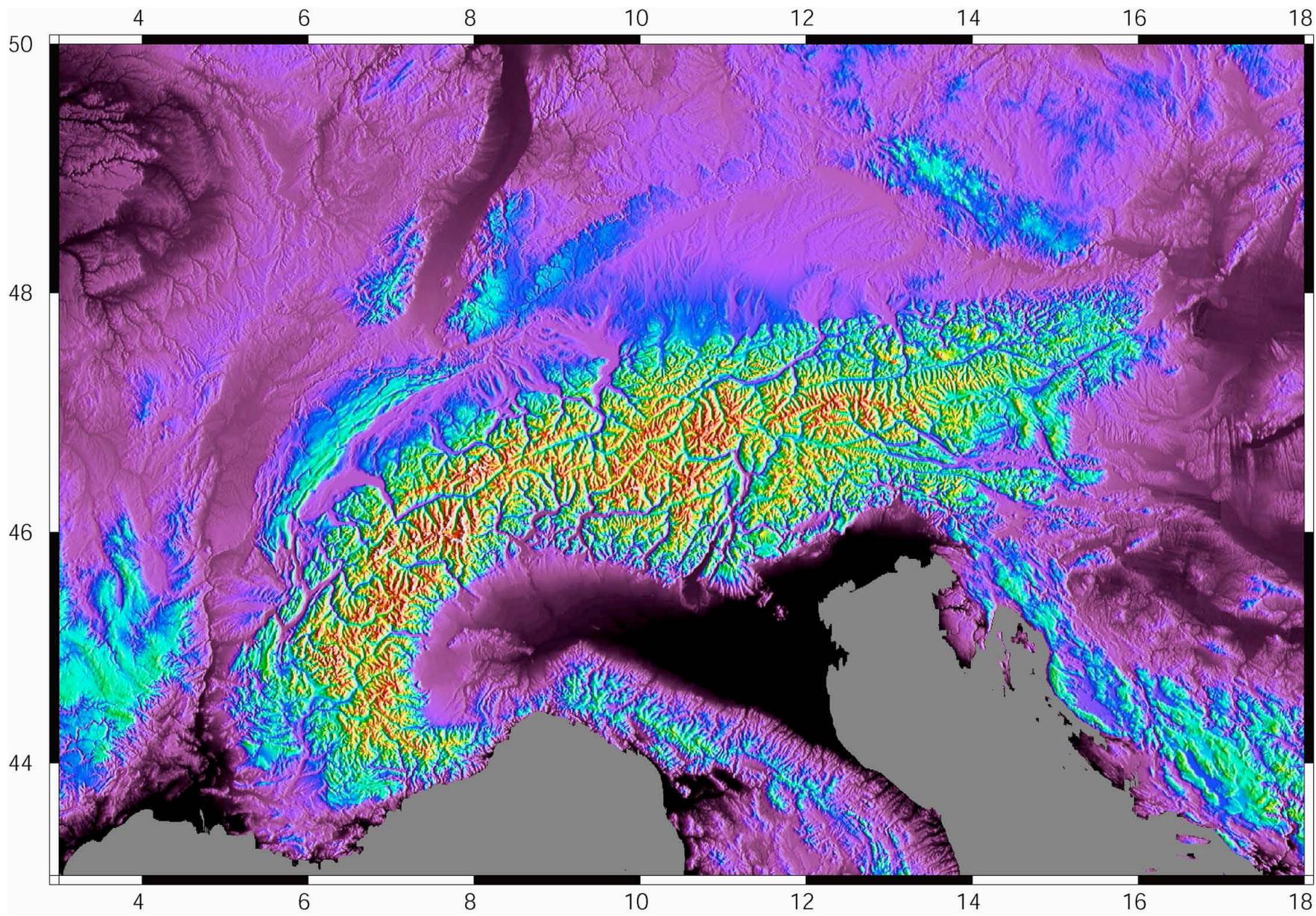
L'orogénèse alpine

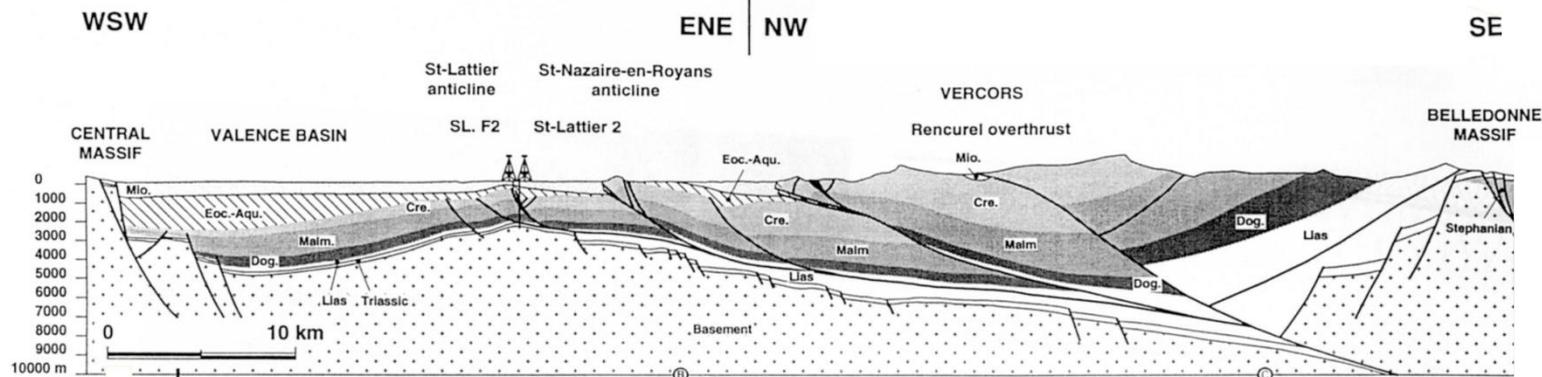


Alpine thrust Belt Paleozoic Basement

Bassins d'avant-pays







VERCORS

Massif Central

Bassin de Valence

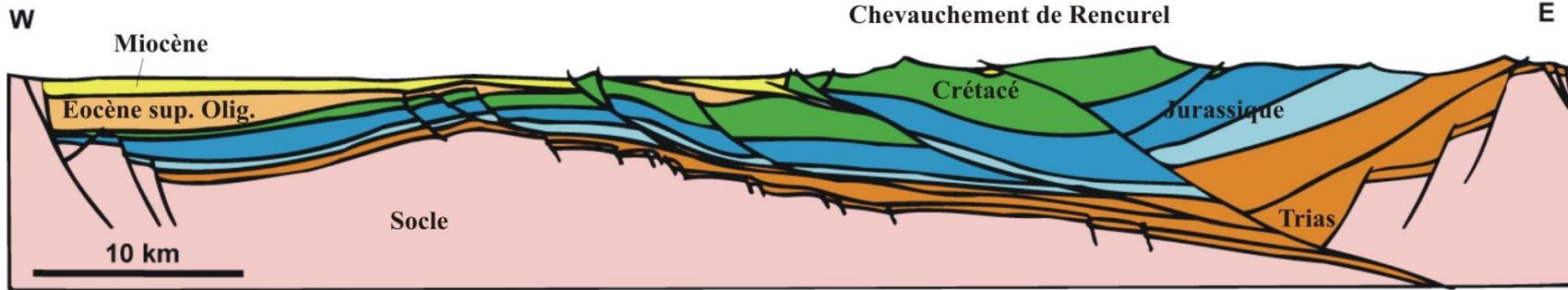
Anticlinal de Saint-Lattier

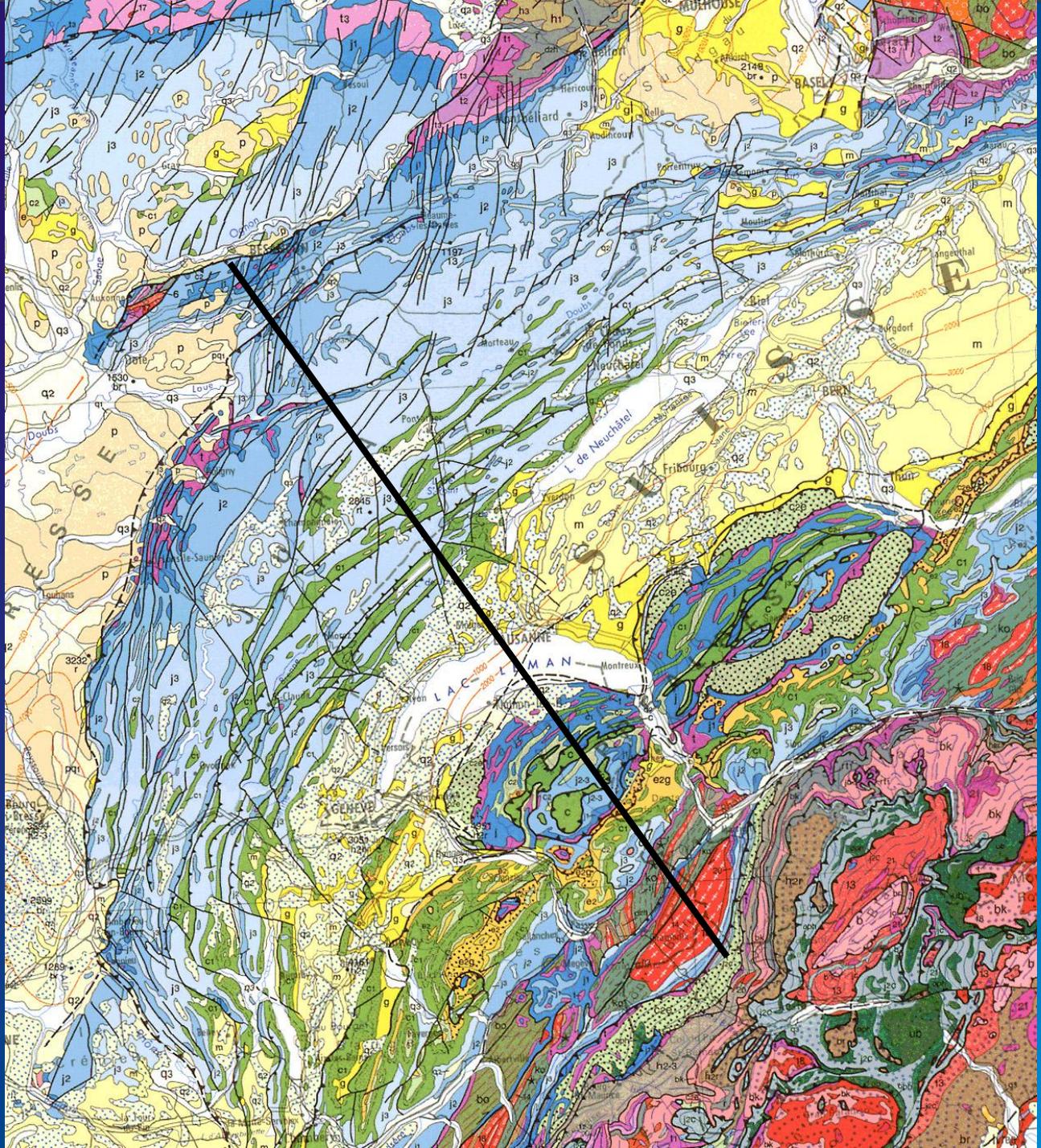
Anticlinal de Saint Nazaire en Royans

Anticlinal de Pont-en-Royans

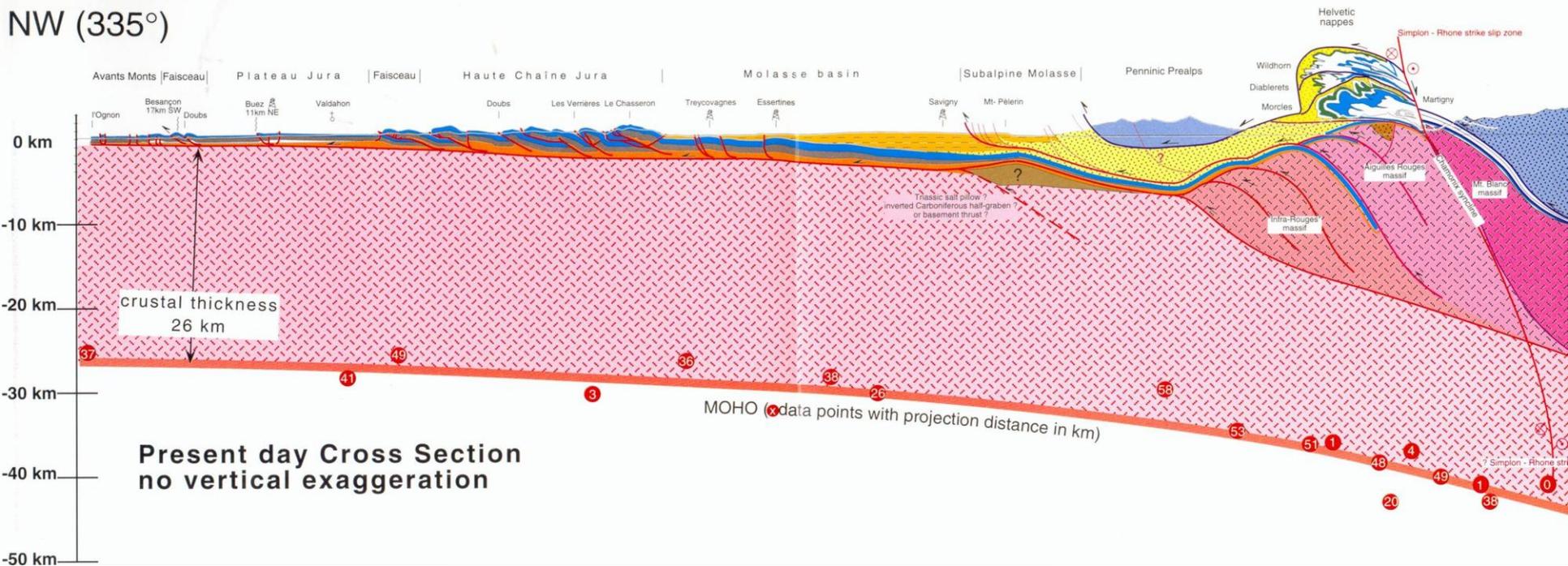
Belledonne

Chevauchement de Rencurel





NW (335°)

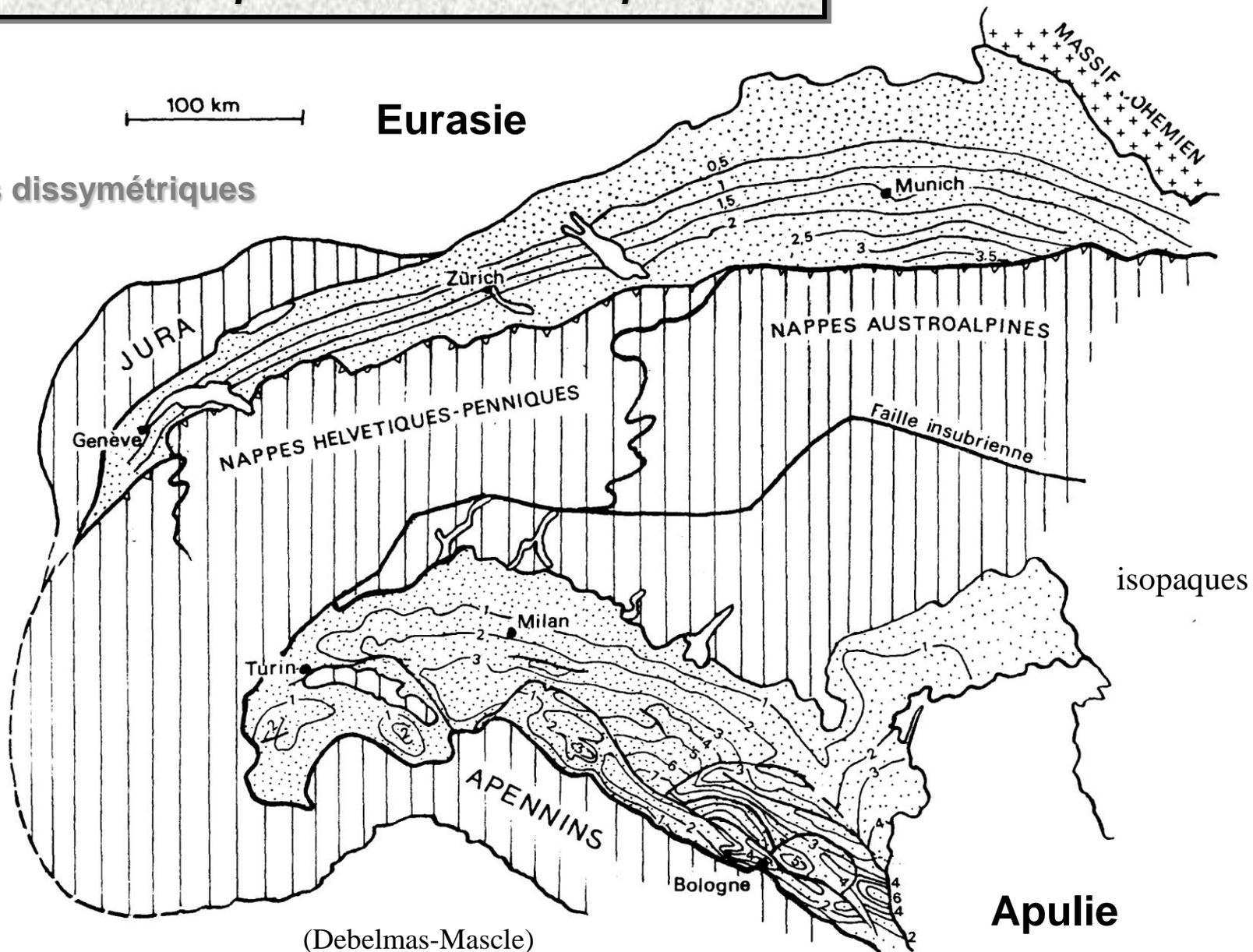


Present day Cross Section
no vertical exaggeration

(Burkhard et Sommaruga, 1998)

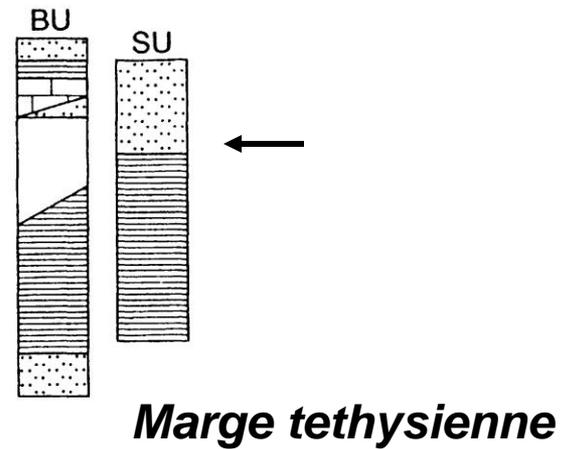
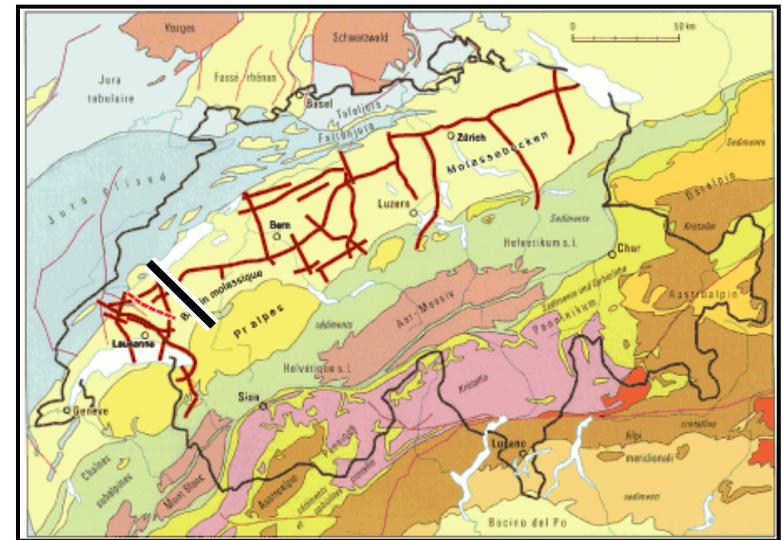
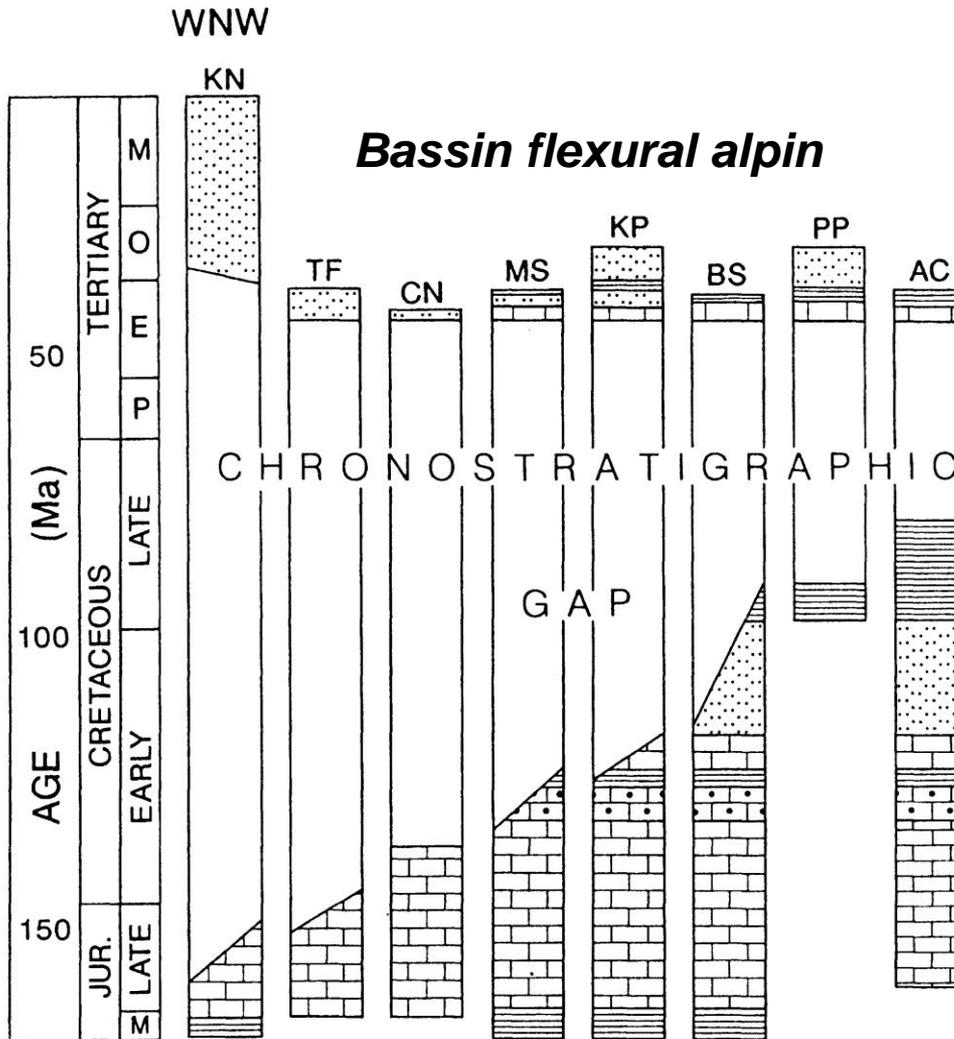
Bassin molassique suisse et bassin padan

Bassins dissymétriques



(Debelmas-Masclé)

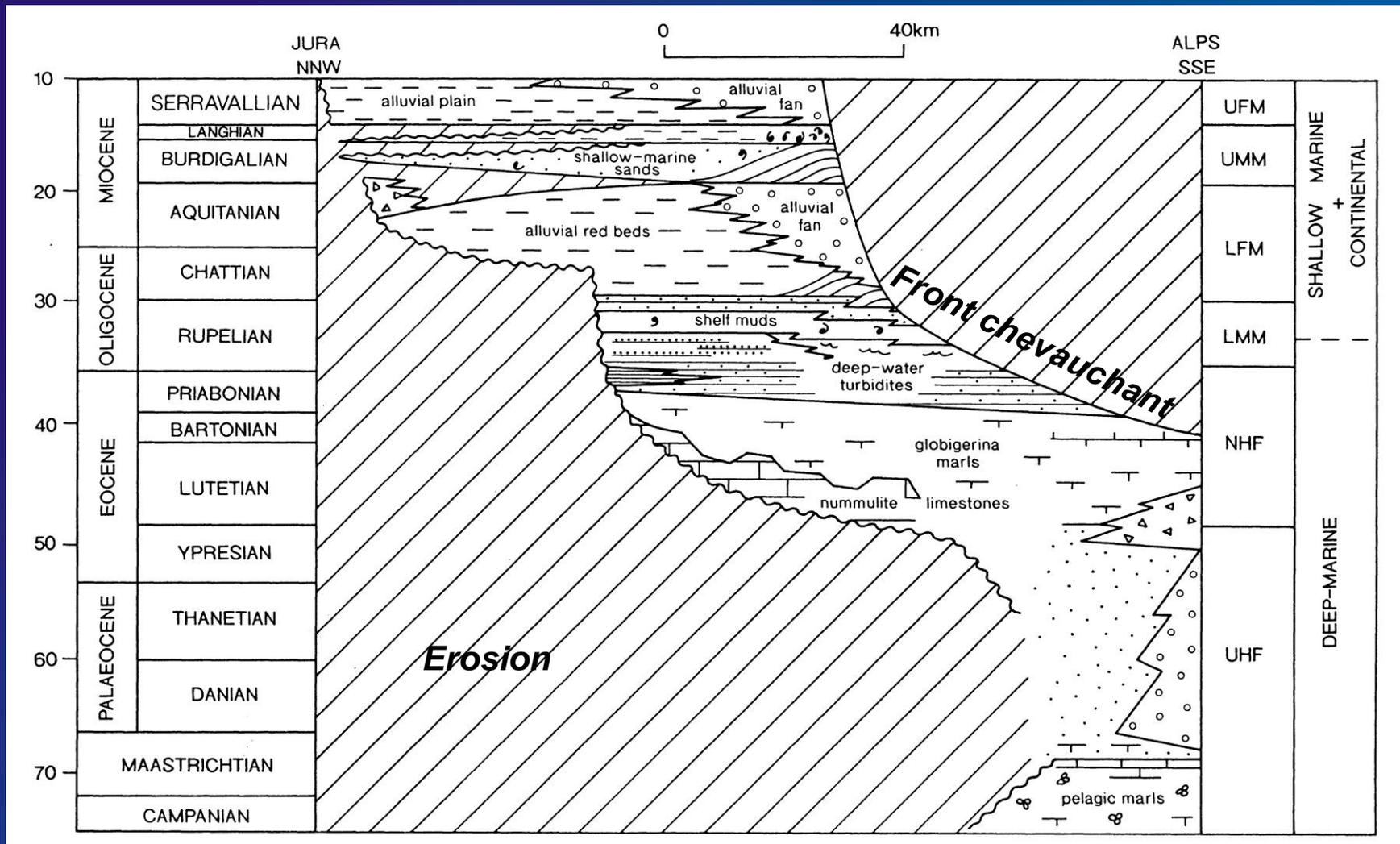
Stratigraphie et géométrie du bassin molassique



-  Shallow-water limestone
-  Siliceous limestone
-  Sandstone
-  Pelagic limestone/marl

Stratigraphie et milieux de dépôts tertiaires dans le bassin alpin

(d'après Sinclair)



« *Flyschs* » Eocène alpins : les grès d'Annot



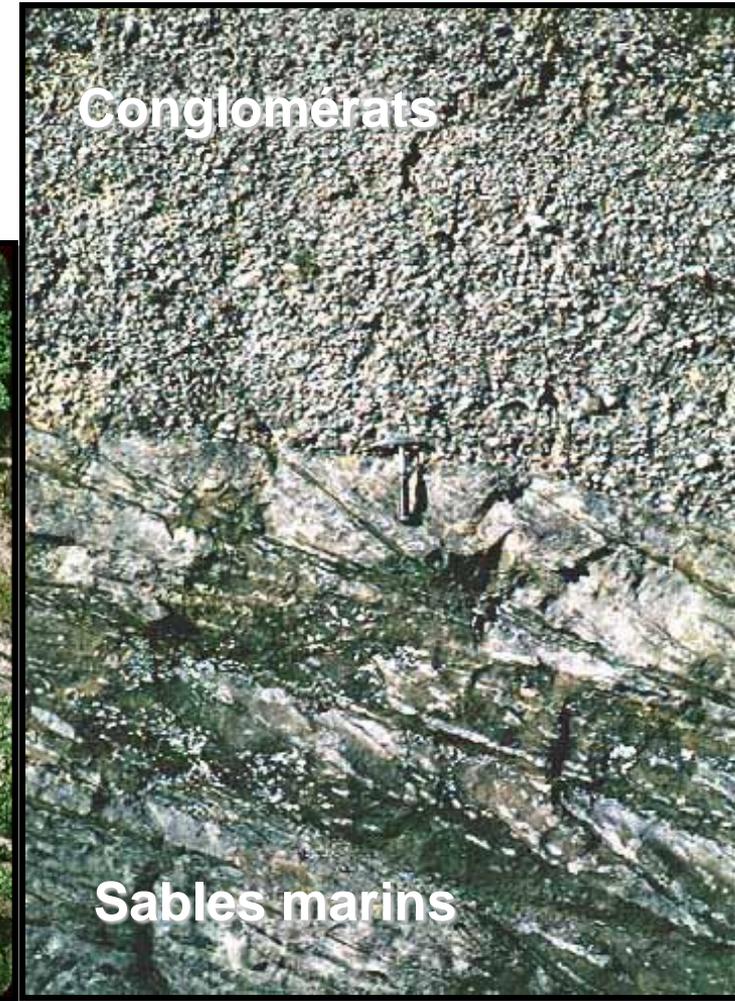
Dépôts marins profonds
turbiditiques éocènes
(Priabonien)

Soulignent l'initiation du
bassin flexural



Molasse Alpine

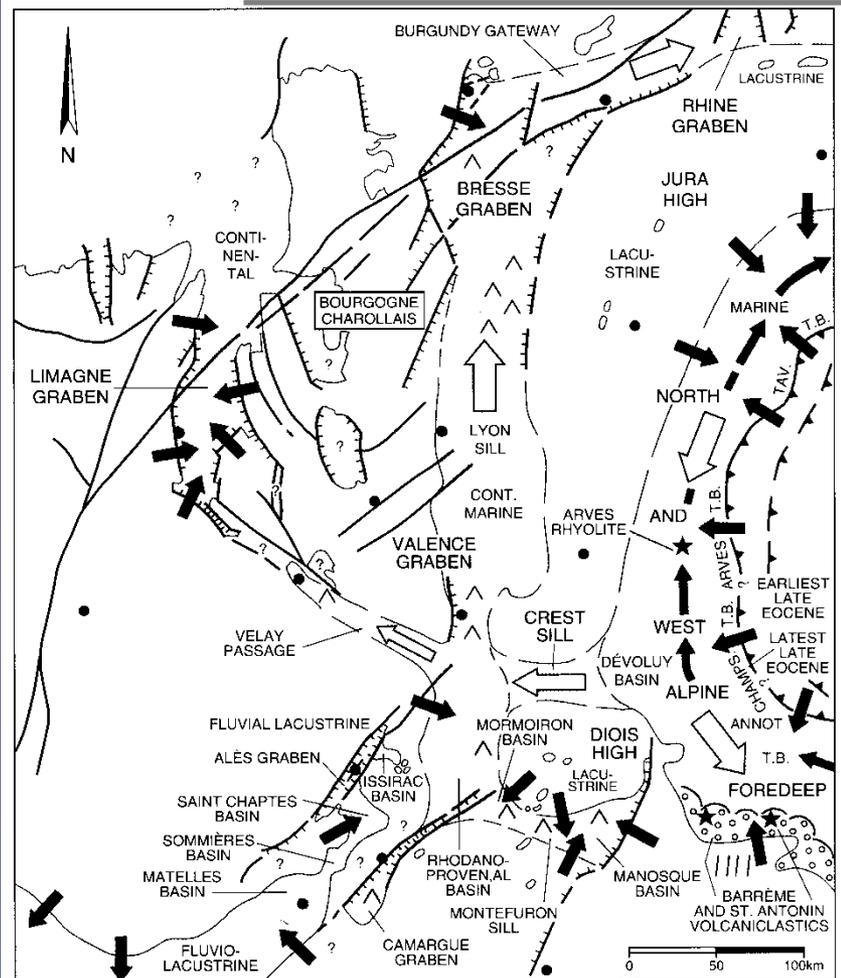
Dépôts fluvi-marins miocènes
contemporains de la croissance de la chaîne



Dépôts d'avant-pays proximaux

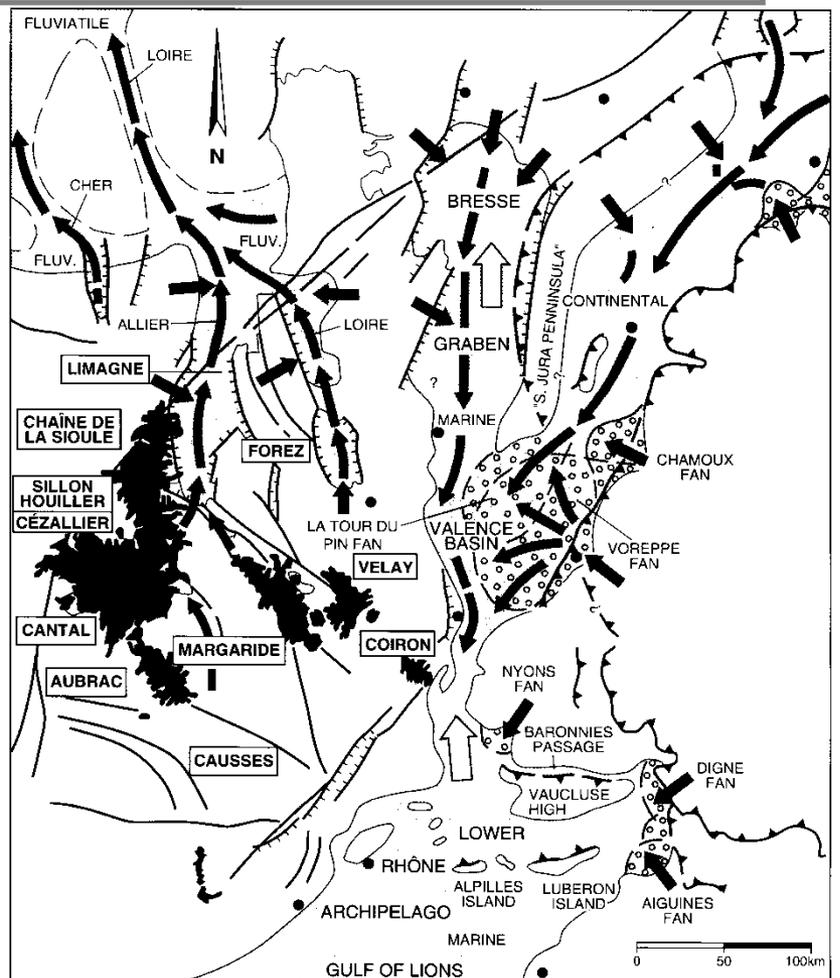
(Sissingh, 1996)

Paléogéographie de l'avant-pays alpin : des flyschs éocènes aux molasses oligo-miocènes



LATE EOCENE: PRIABONIAN

	GENERAL DIRECTION OF MARINE INCURSION		EVAPORITES
	LOCAL DIRECTION OF CLASTIC SUPPLY		ORGANIC (ANOXIC)
	REGIONAL DIRECTION OF CLASTIC TRANSPORT		THRUST FRONT
			ACTIVE VOLCANIC AREA OF MASSIF CENTRAL



MIDDLE-LATE MIOCENE P.P.: LANGHIAN-TORTONIAN

	GENERAL DIRECTION OF MARINE INCURSION		(POSSIBLE) ISLAND AND / OR SHOAL
	LOCAL DIRECTION OF CLASTIC SUPPLY		THRUST FRONT
	REGIONAL DIRECTION OF CLASTIC TRANSPORT		LATE CENOZOIC VOLCANOES UNDIFF.
			ACTIVE VOLCANIC AREA OF MASSIF CENTRAL

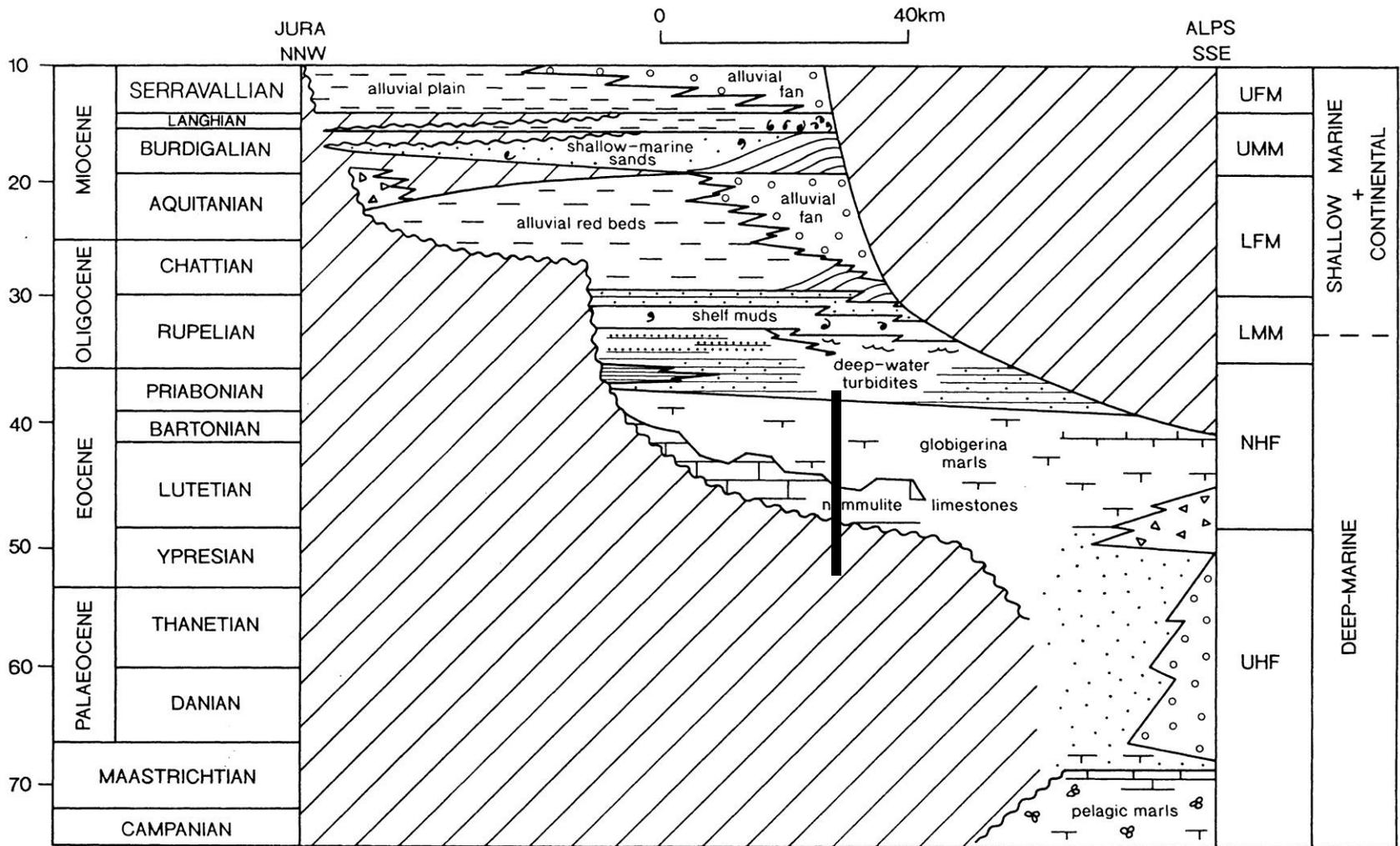






*Conglomérats du
Langhien,
Croix de Lichou*

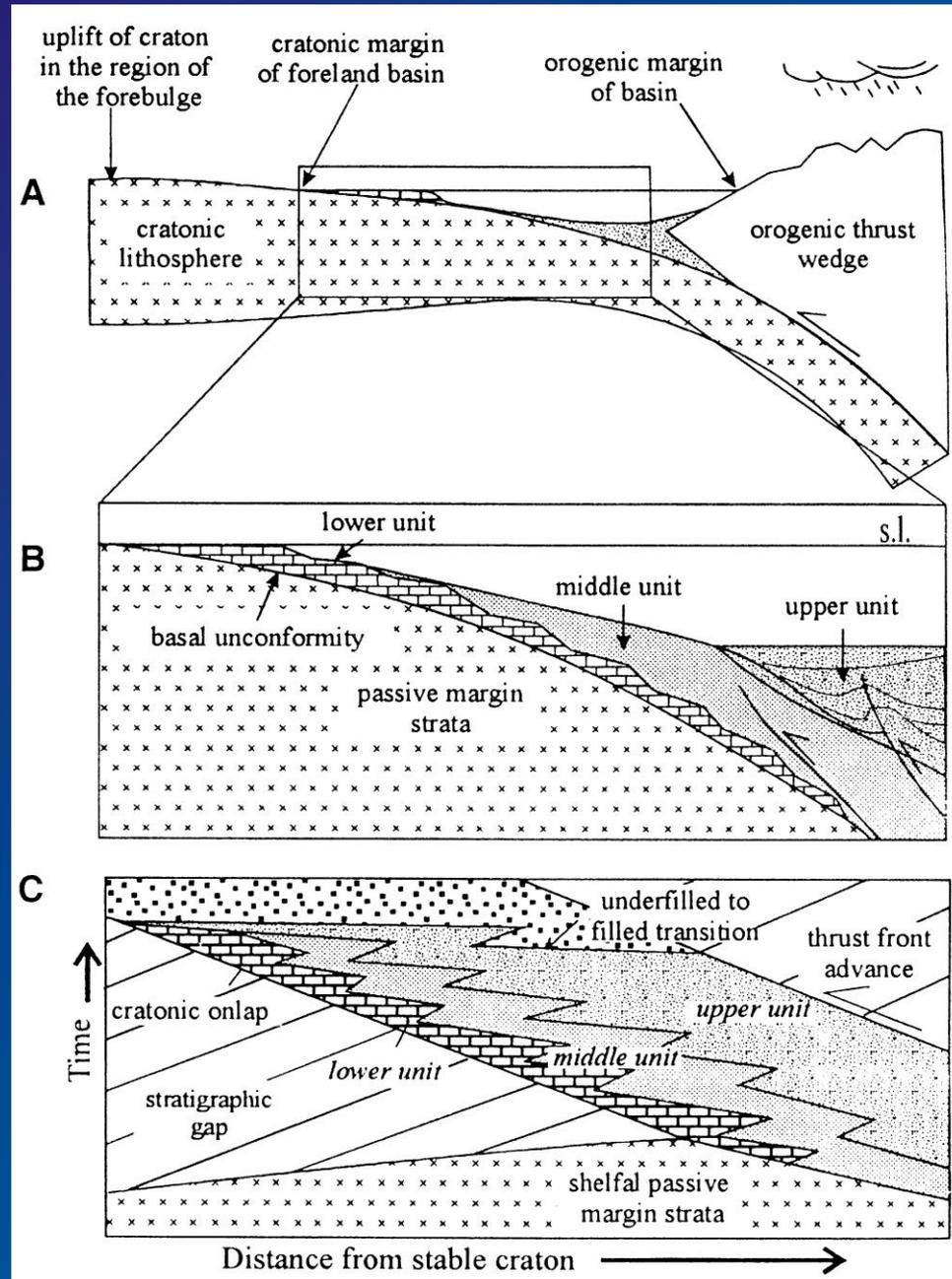
Coupe stratigraphique reconstituée du bassin flexural alpin



*Début du développement
du bassin et migration
sur la marge à l'Eocène*

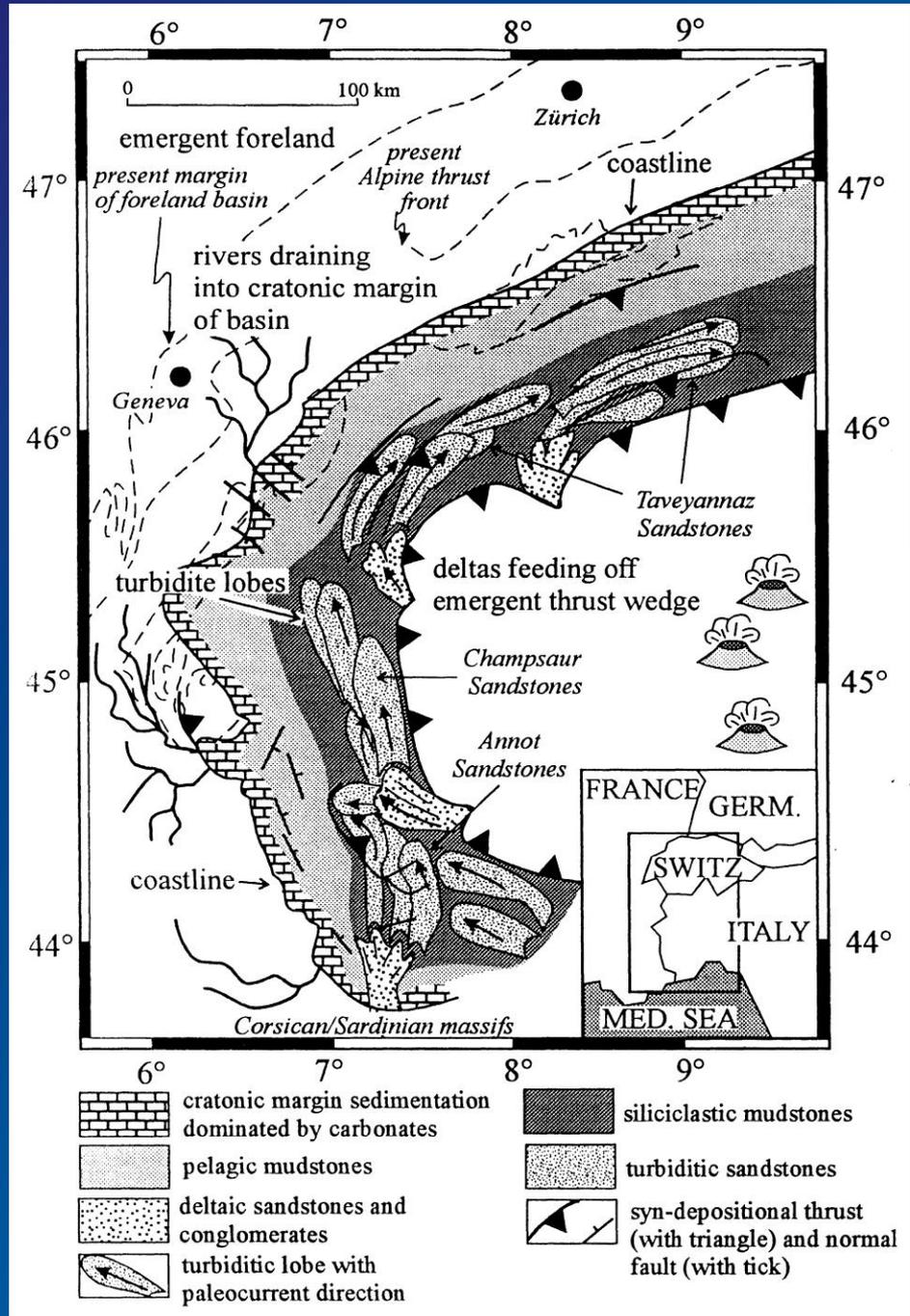
*Reconstitution
du bassin
au Priabonien*

Stratigraphie



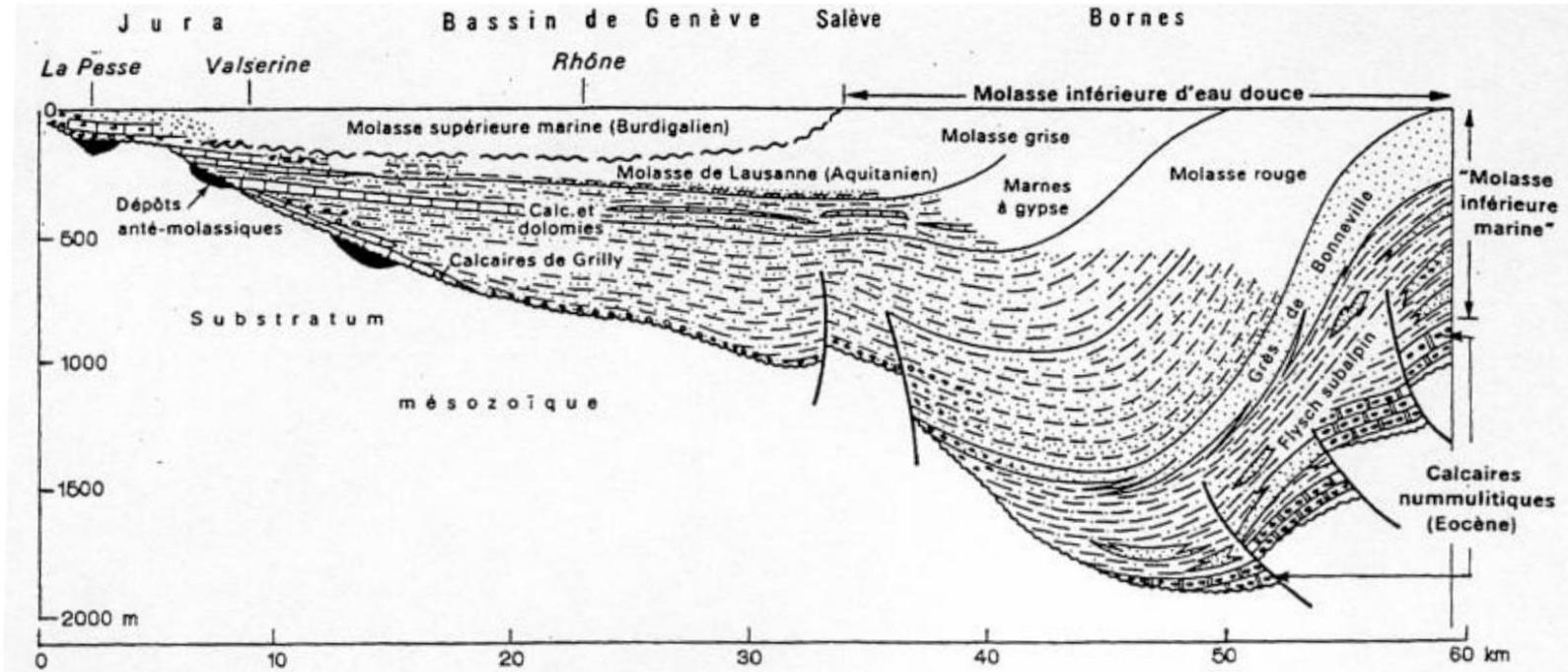
L'avant-pays alpin à l'Eocène

La trilogie calcaire/
marnes/flyschs
souligne la géométrie
initiale du bassin



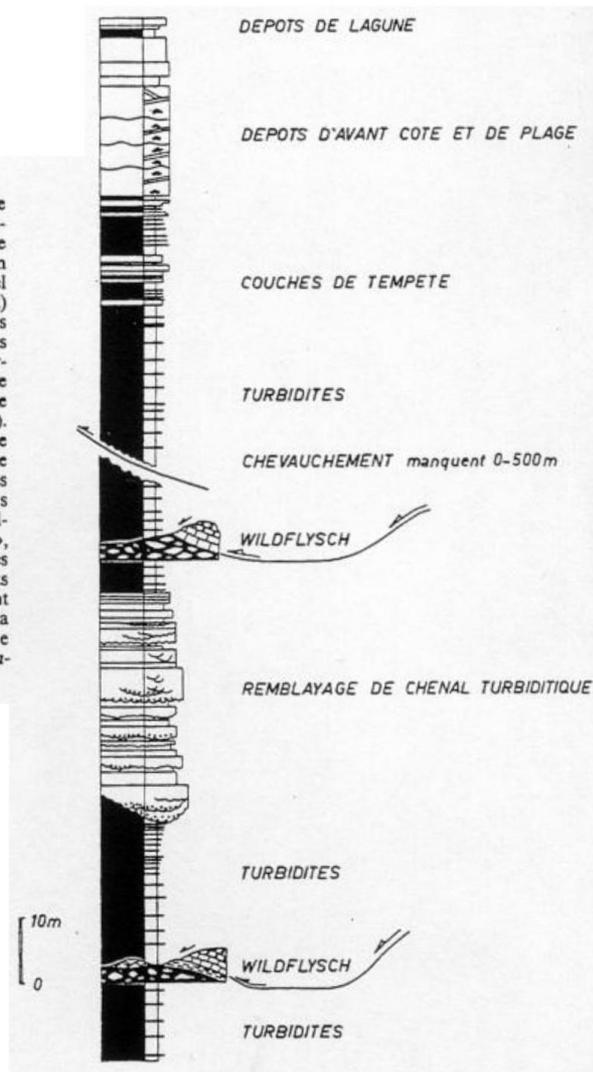
NW

SE

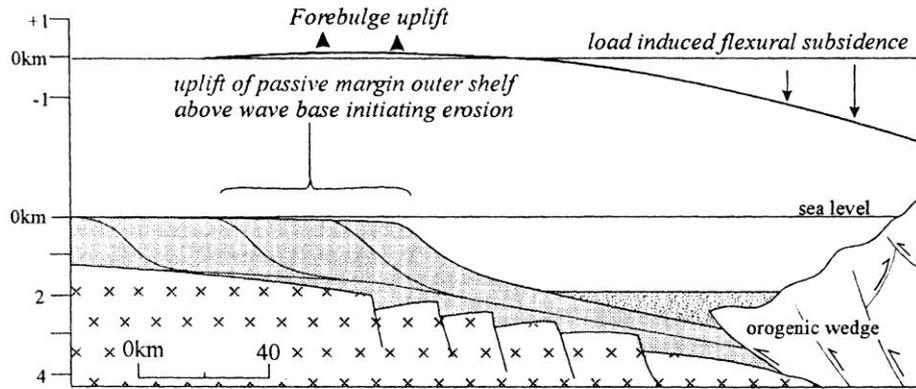


Les dépôts molassiques au front des chaînes subalpines au niveau du sillon savoyard. Reconstitution du bassin flexural avant la tectonisation miocène. D'après Debrand-Passard *et al.*, 1984.

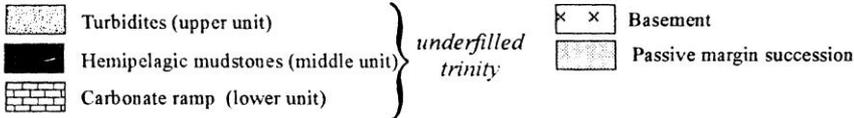
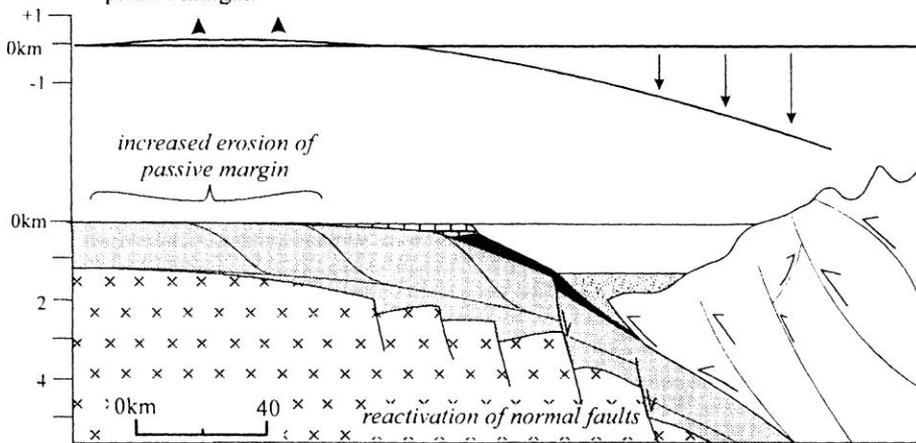
Profil schématique de la Molasse marine inférieure. La partie inférieure montre l'interstratification des olistostromes à matériel préalpin (dérivé du sud-est) avec les pélites et turbidites provenant du sud-est. Les corps gréseux plus importants de la série turbiditique sont des remplissages de chenaux (faciès « Cucloz »). La partie supérieure montre la série régressive terminale de ce groupe (faciès « grès de Bonneville », « grès des Carrières », « grès de Vaulruz », « Horwerplatten », « Baustein »). Les structures sédimentaires des dépôts d'avant-côte et de plage sont des rides de vagues, de la stratification oblique et le *hummocky cross-stratification*.



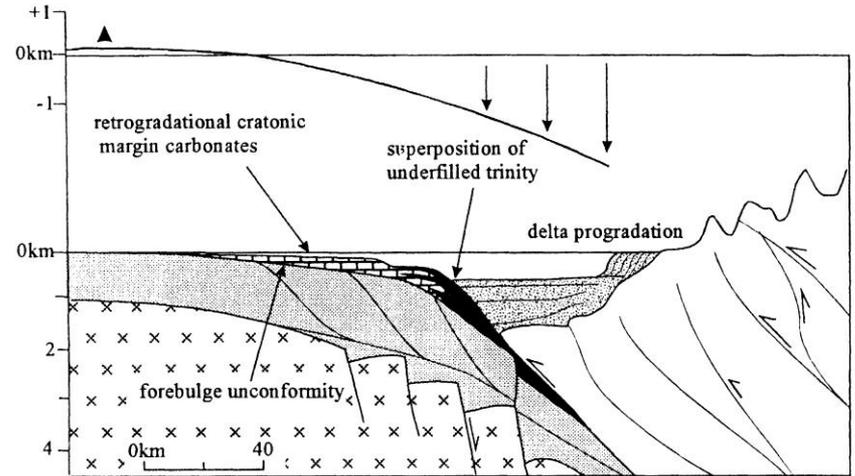
Stage 1. Initial loading of outer passive margin, eg., present day Taiwan, Timor and Papua New Guinea. Paleocene in the Alps.



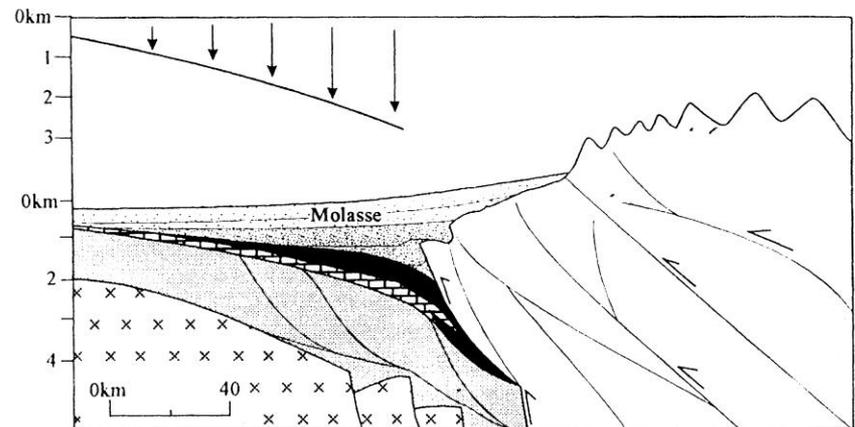
Stage 2. Development of underfilled trinity as flexural profile passes over passive margin.



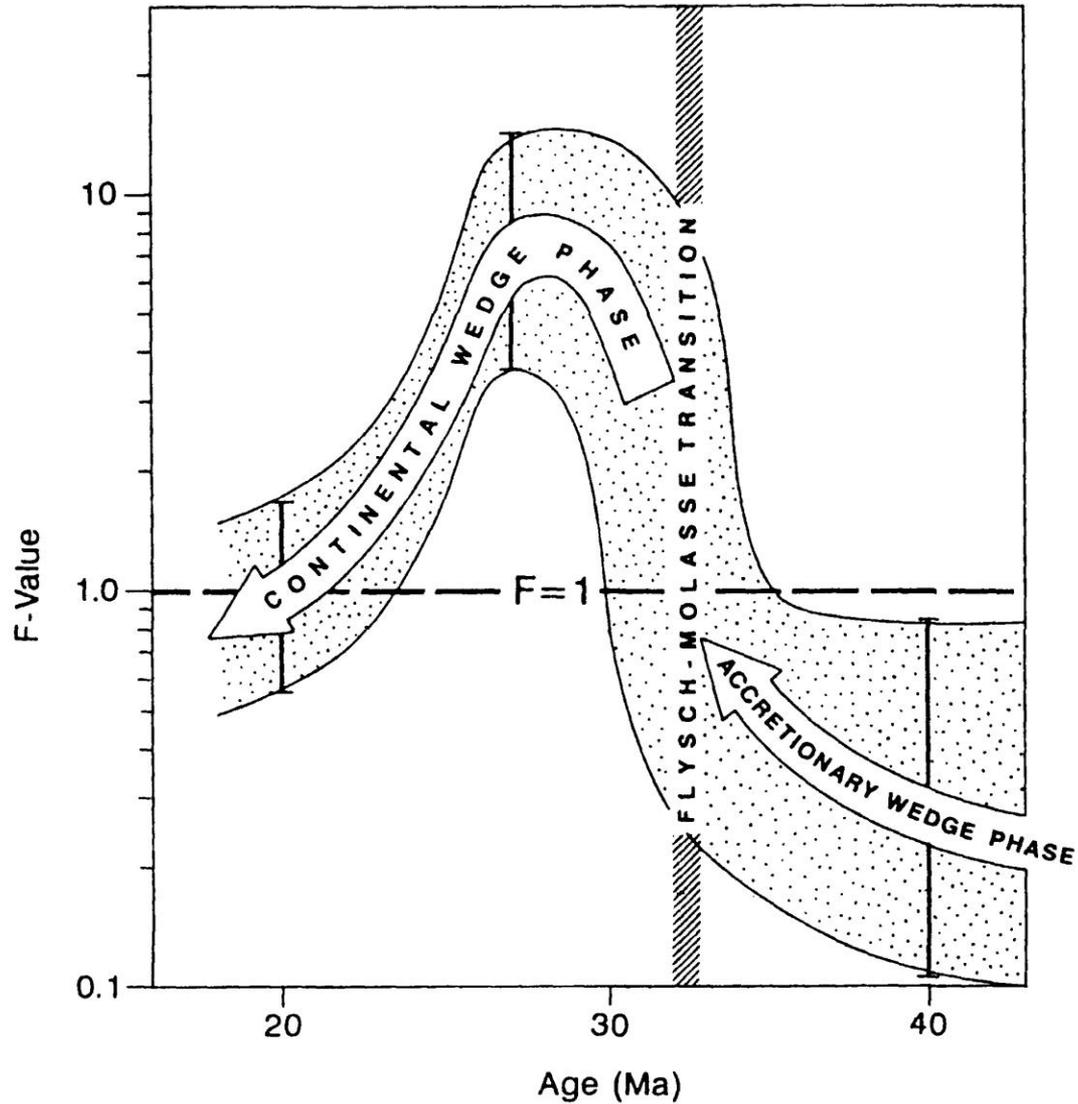
Stage 3. Steady state migration of the underfilled trinity over the craton i.e., rate of thrust front advance equals rate of cratonic onlap



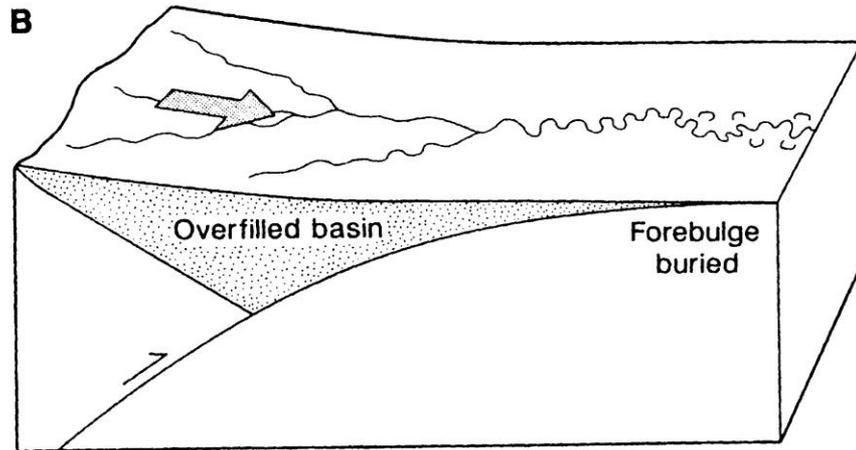
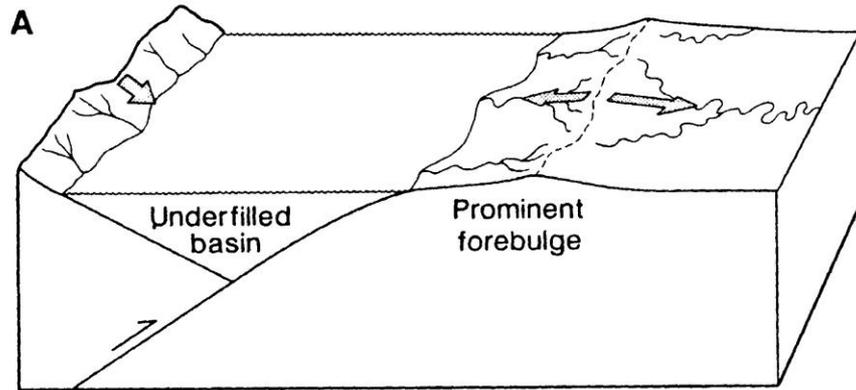
Stage 4. Transition of foreland basin from an underfilled to a filled depositional state. Siliciclastics from orogen fill the basin, smothering the underfilled stratigraphy.



Modèle d'accommodation

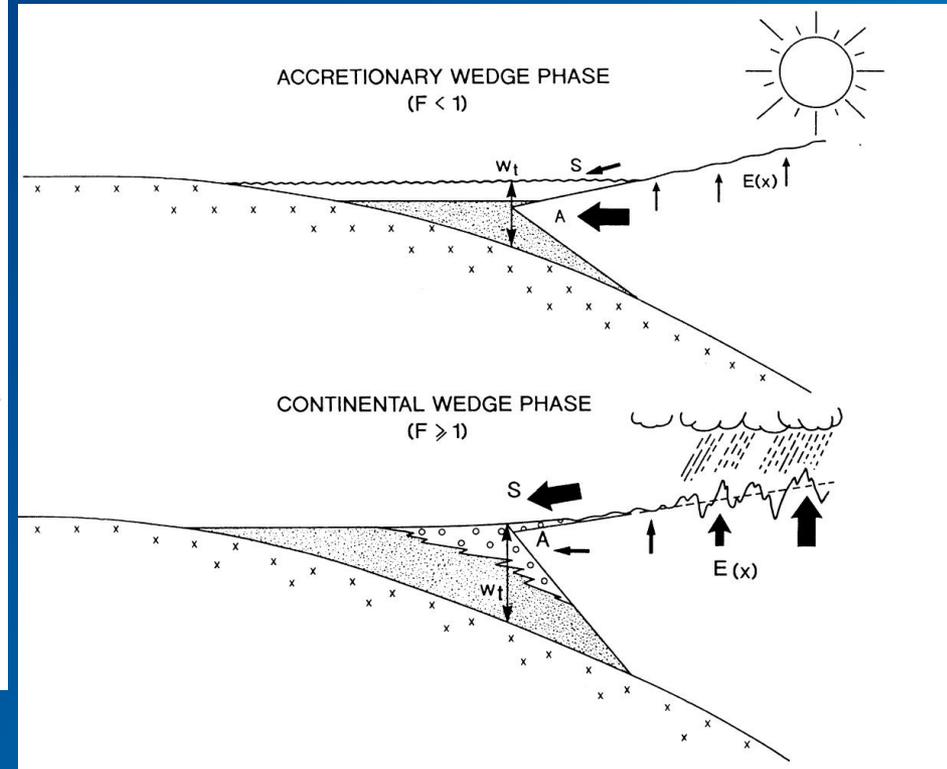


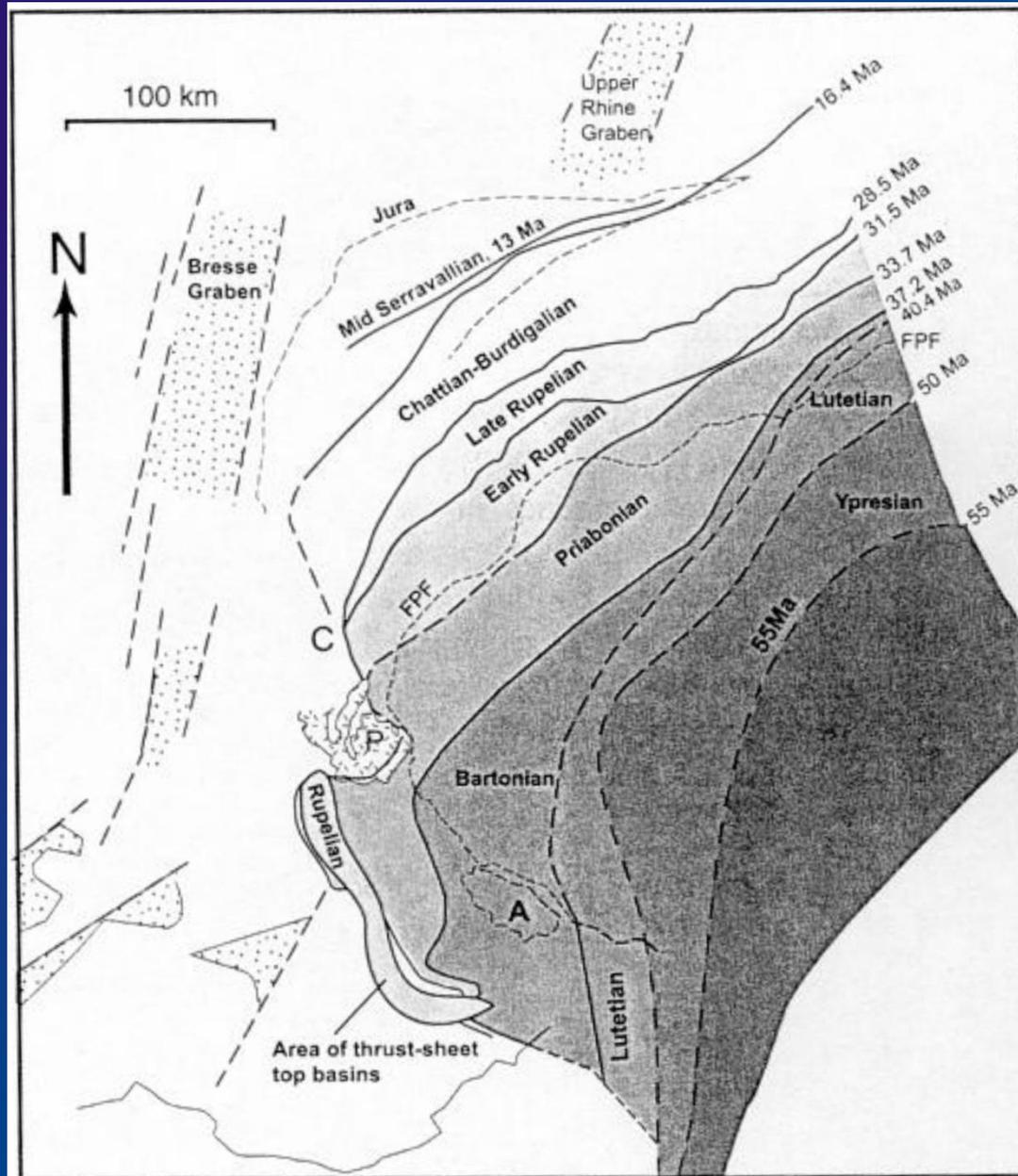
Evolution en 2 stades de l'avant-pays alpin



Stade 1:
Bassin sous-alimenté

Stade 2:
Bassin sur-alimenté



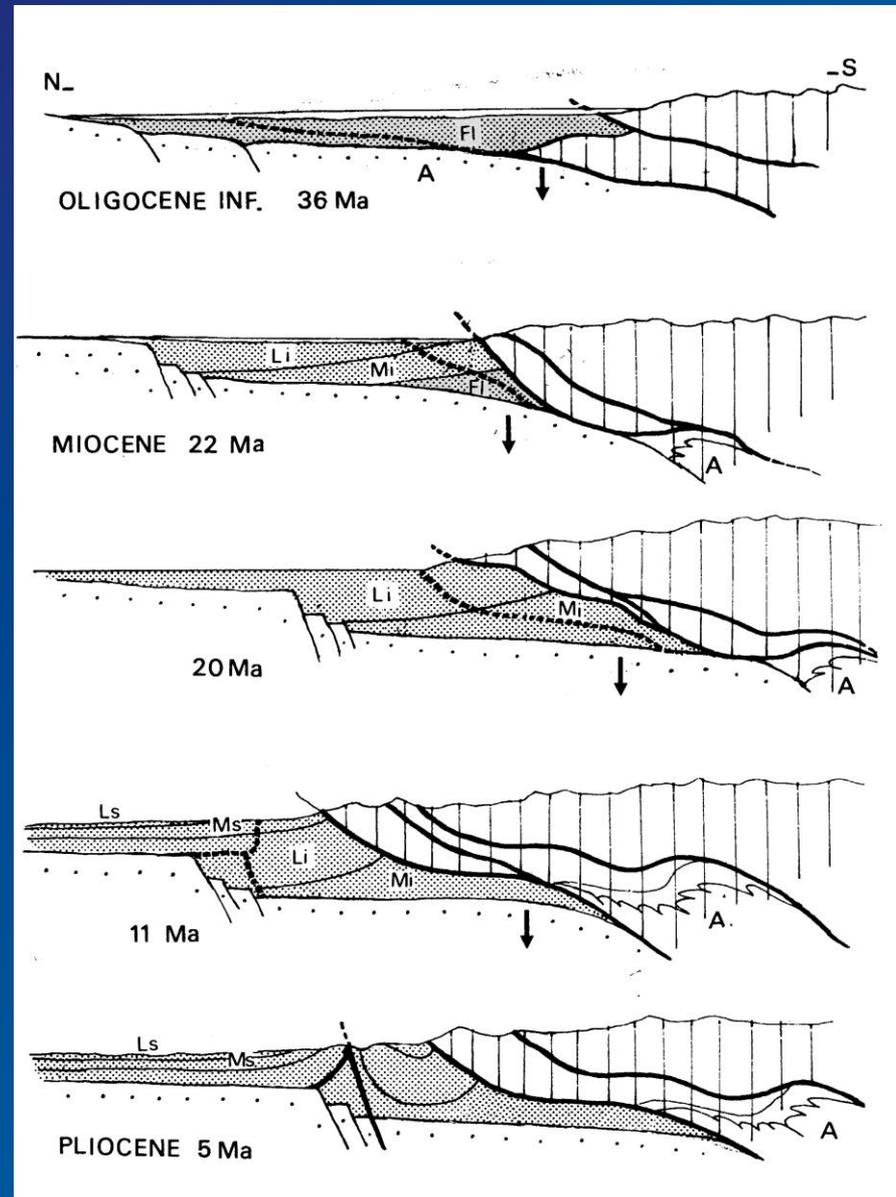


(d'après Ford et al., GSL)

L'ensemble orogène/bassin migre avec la propagation de la collision

Migration des dépocentres molassiques et du front de chevauchement vers les zones externes

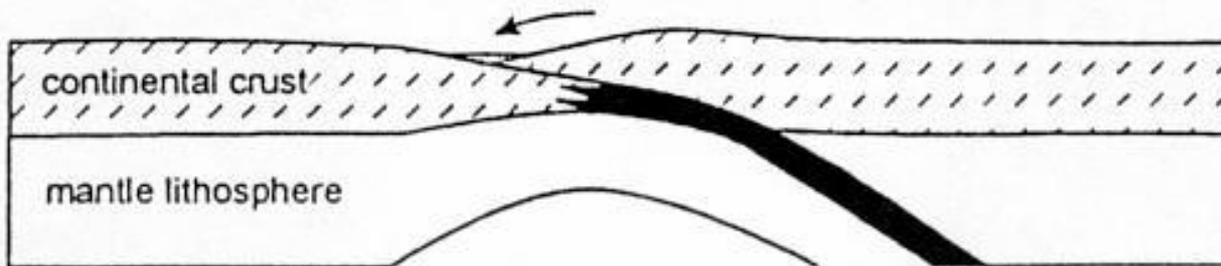
Fl = Flyschs
Mi = Molasse inf. Marine
Li = Molasse inf. Lacustre
Ms = Molasse sup. Marine
Ls = Molasse sup. Lacustre



(Debelmas-Masclé)

subduction

deep-water
flysch basin

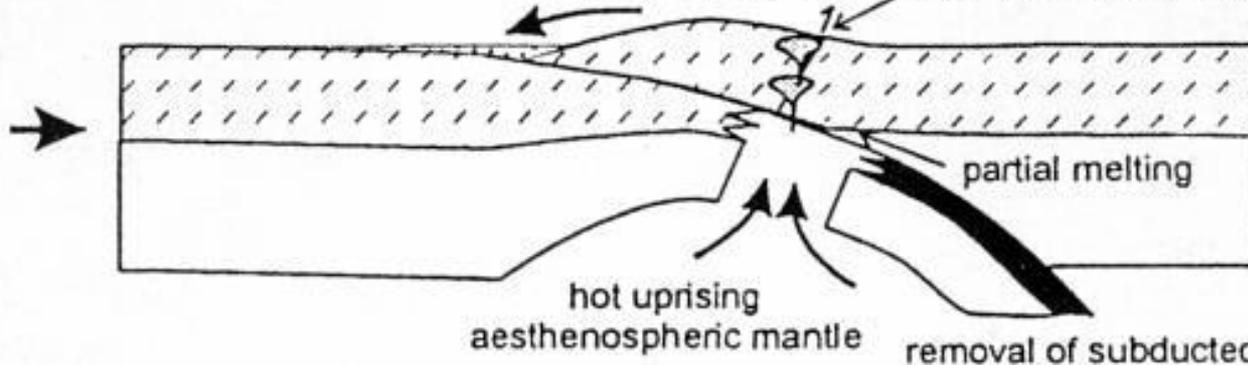


slab breakoff

molasse
basin

accelerated uplift
and exhumation

Insubric backthrusting



Conglomérats de Valensole

Molasse marine Aquitaniennne
Molasse continentale Oligocène

Grès d'Annot
Grès du Champsaur
Eo-Oligocène

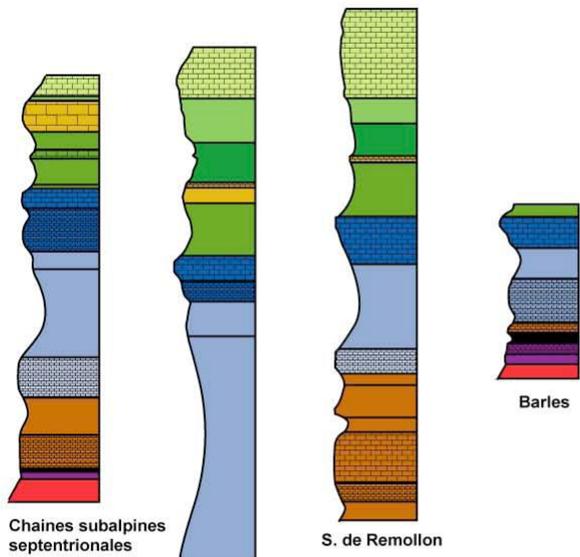
Flysch noir
Eocène

Schistes Lustrés

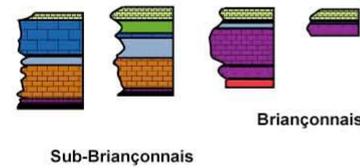
Flysch à helminthoïdes
Crétacé supérieur

M O L A S S E S

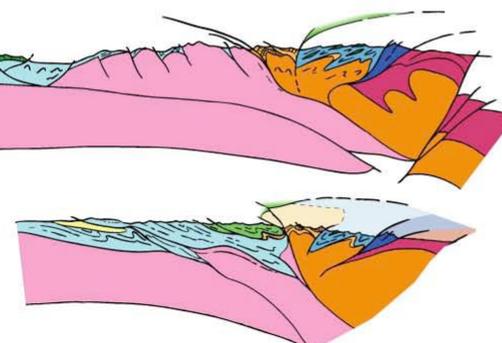
F L Y S C H



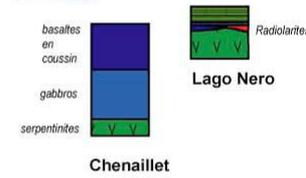
DAUPHINOIS



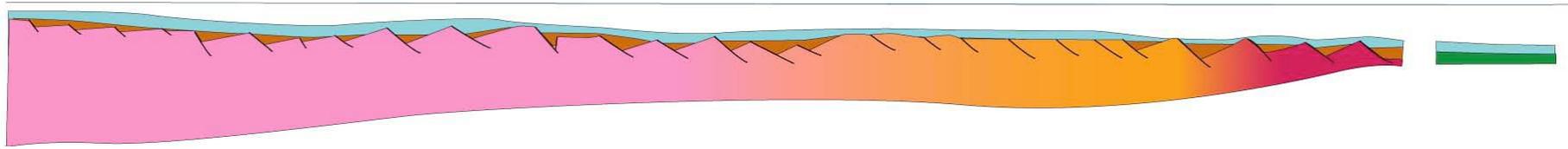
BRIANÇONNAIS

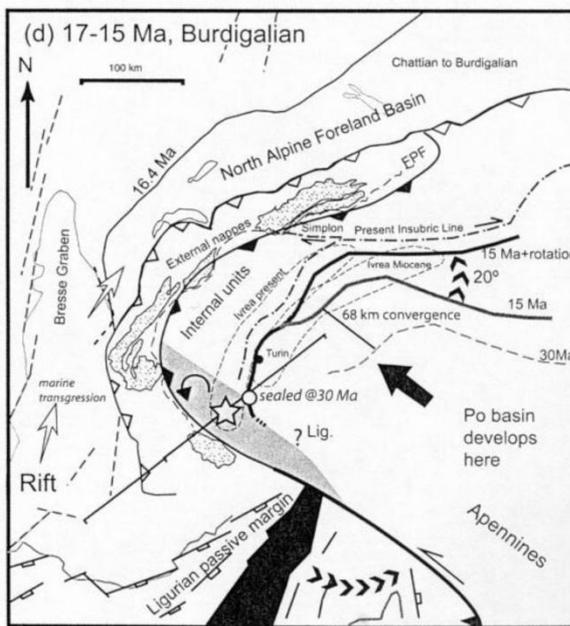
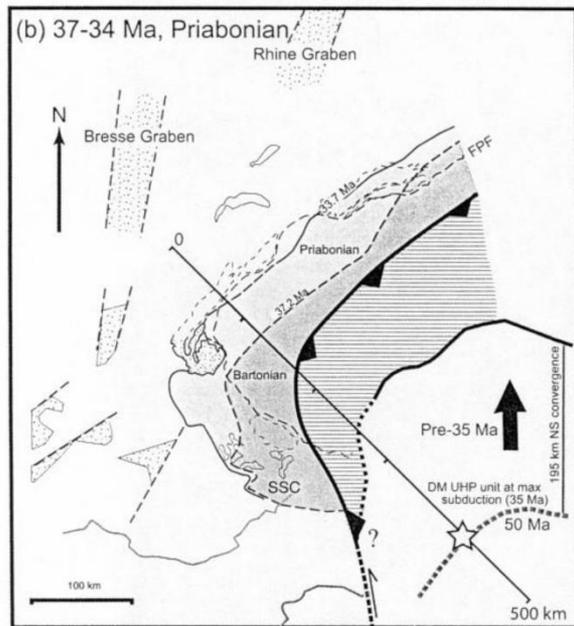
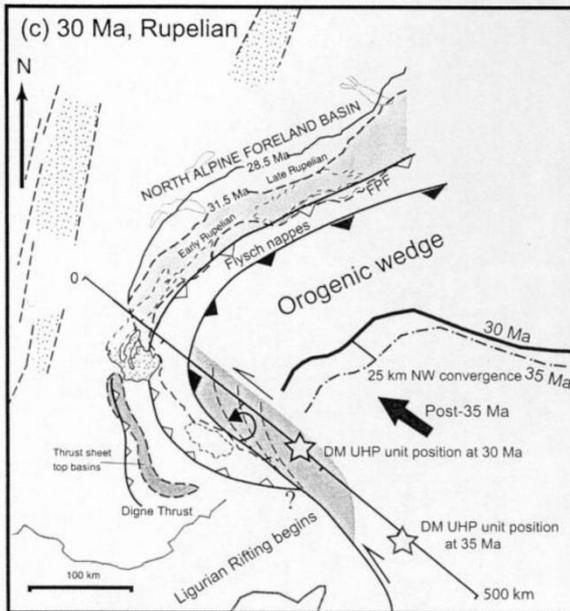
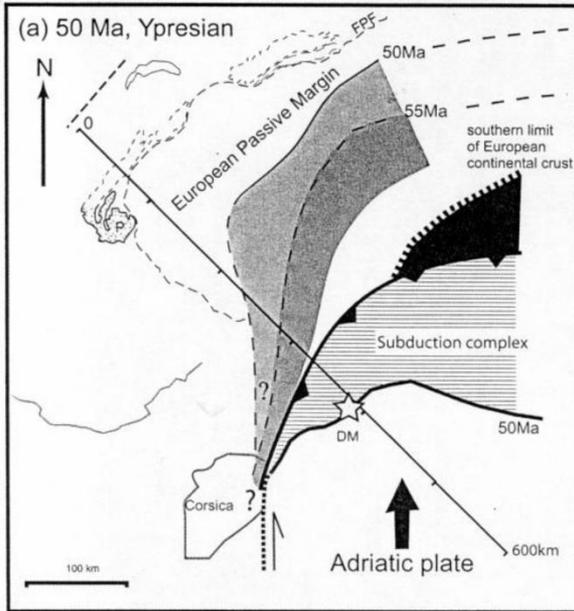


PIEMONTAIS

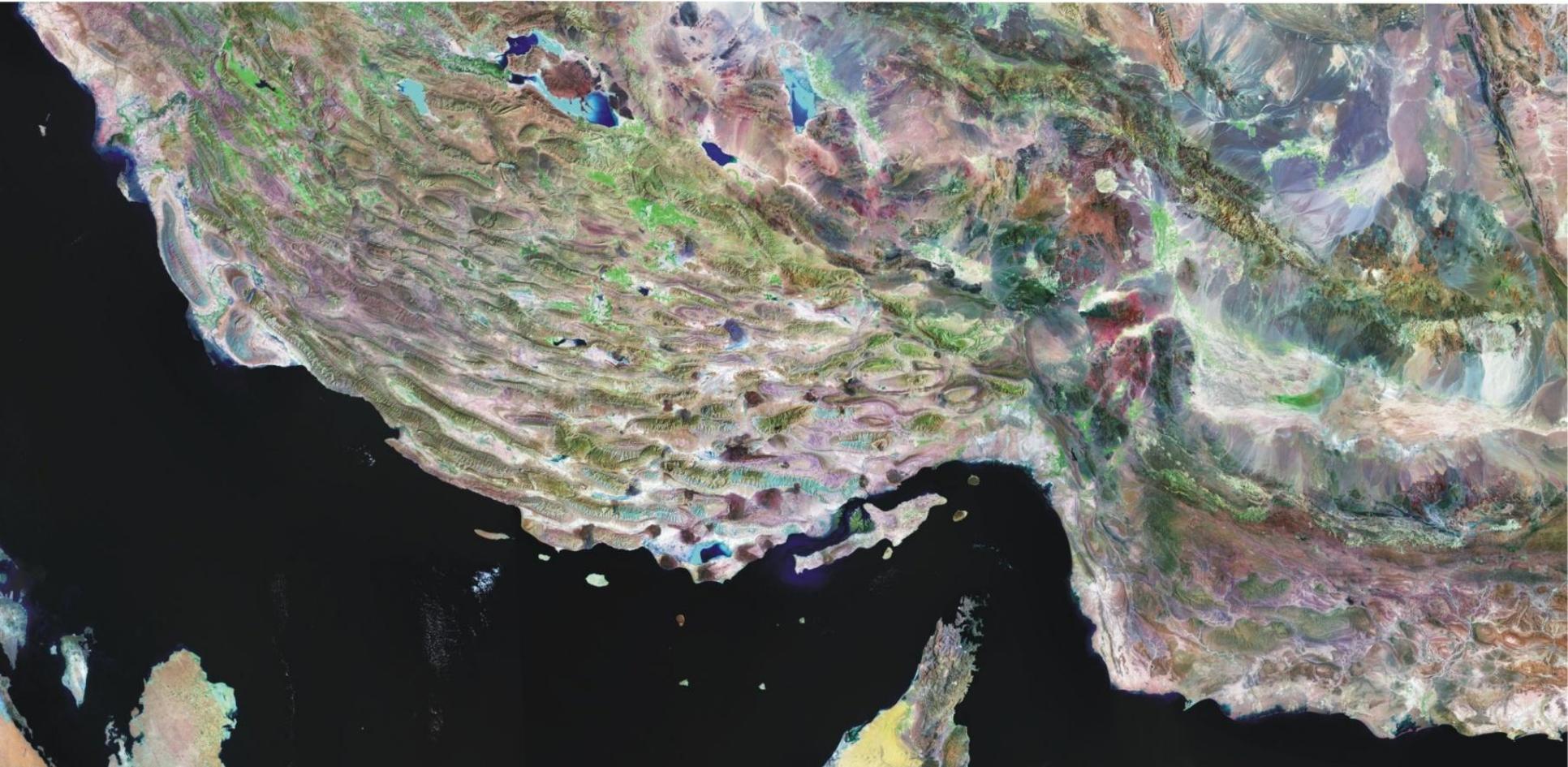


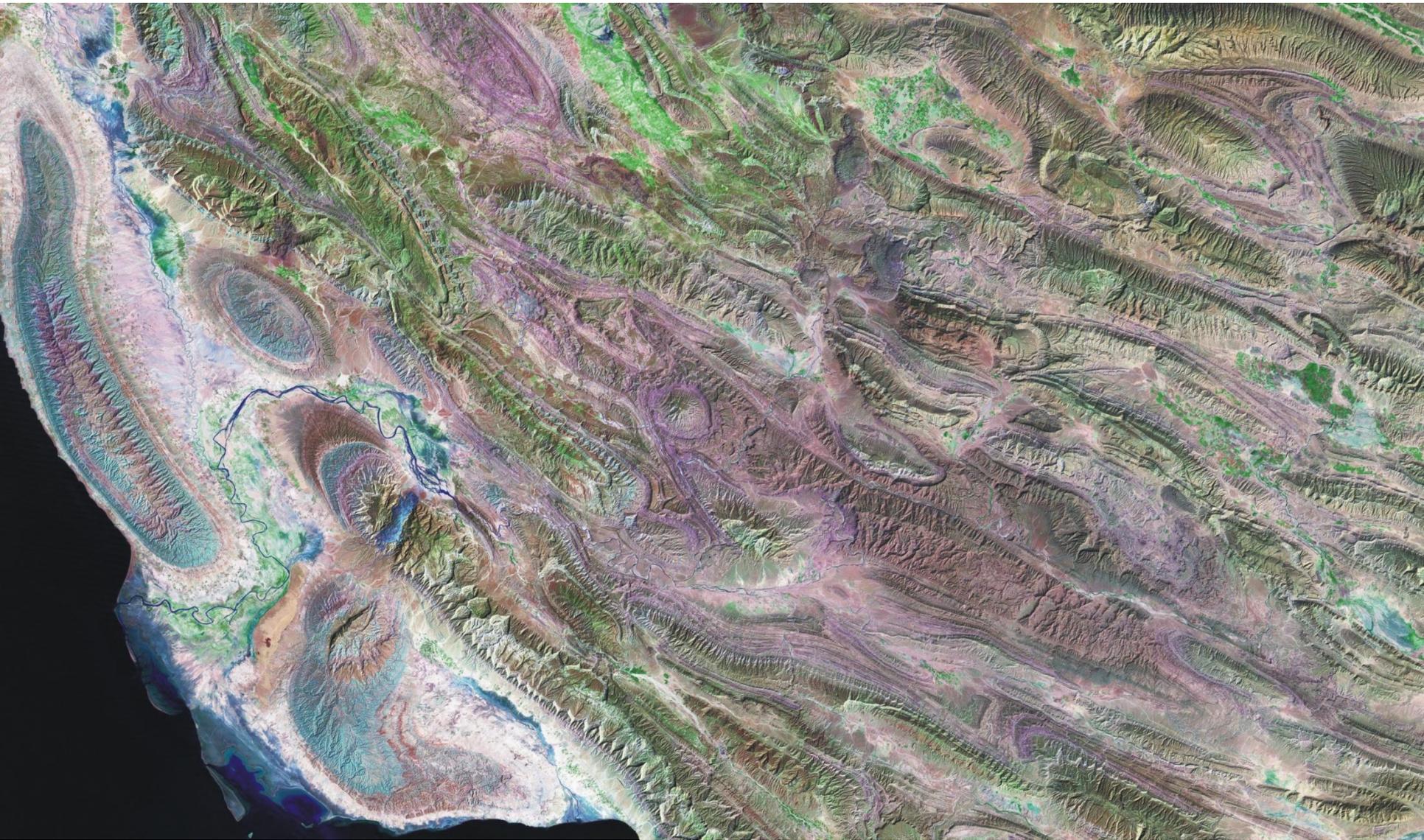
LIGURE

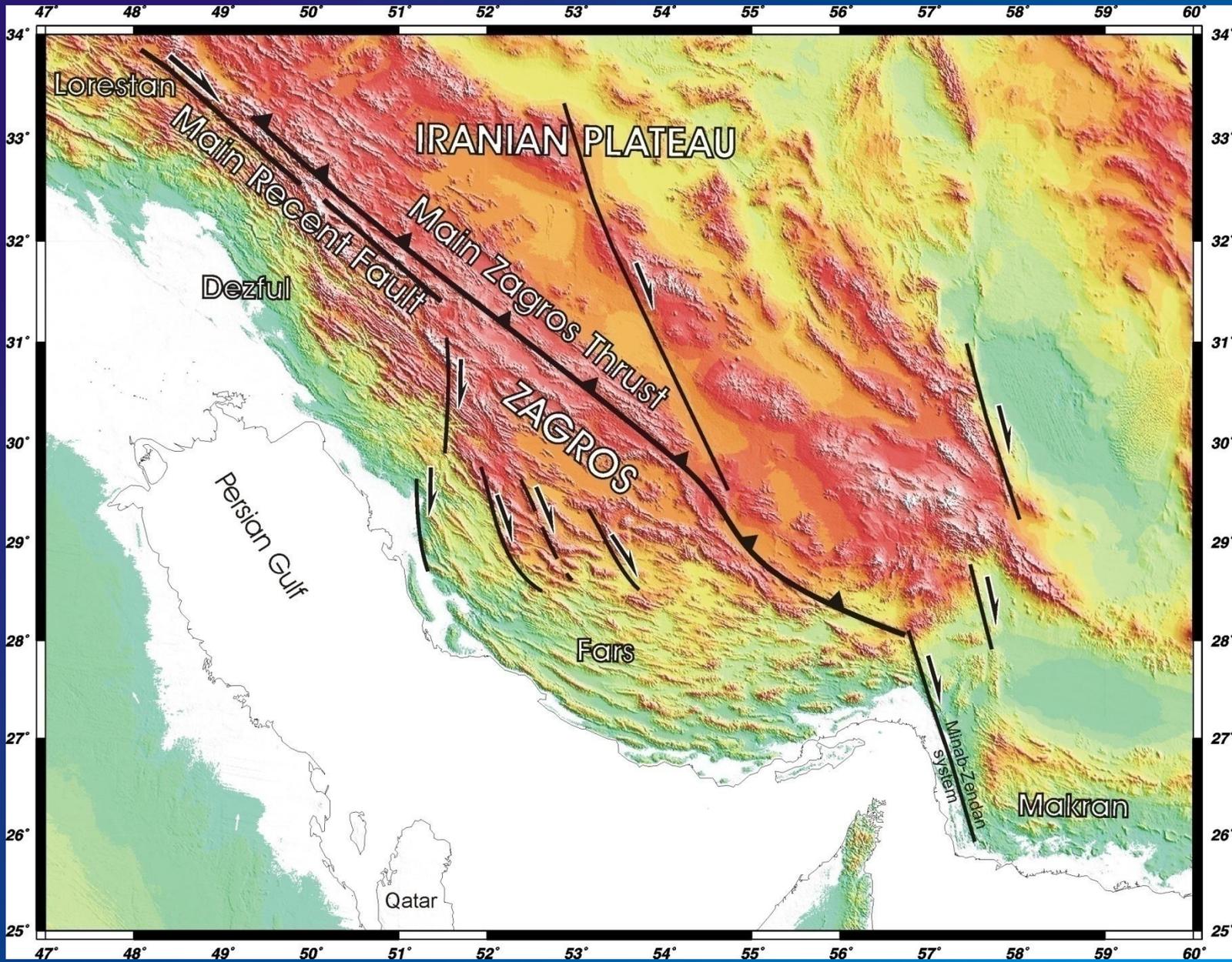




**Le bassin d'avant-pays
et la chaîne plissée du Zagros**







Regressive sequence; progressive infilling of the flexural foredeep related to Arabia-Eurasia collision

Fluvial and lacustrine
Final stage of collision
Major unconformity

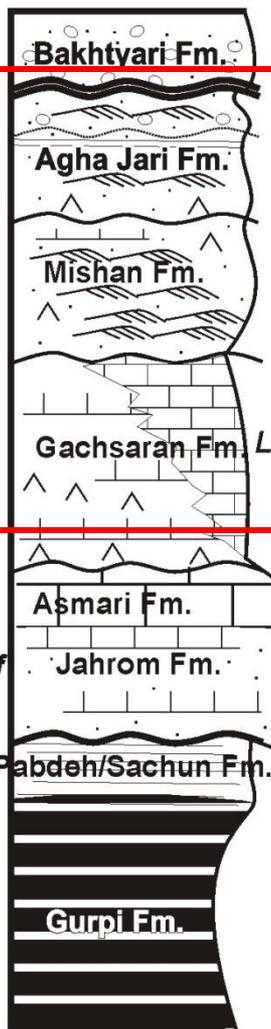
Deltaic and Estuarine

Detritic Shelf

Carbonaceous Shelf

Carbonaceous Shelf

External platform/Basin deposits
in foredeep related to flexure of Arabian plate following ophiolite emplacement



Conglomerates

**Sandstones-
Conglomerates. Alluvial fan**

**Sandy marls.
Alluvial fan**

**Limestones (Champeh Mb.)
Evaporites/Marls**

Limestones

Dolomites

**Shales
Marls/Continental**

Marls

**Pliocene
Pleistocene**

Miocene

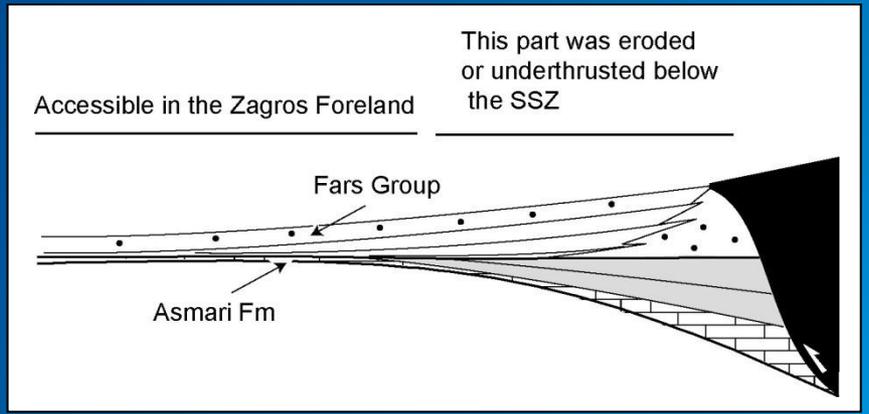
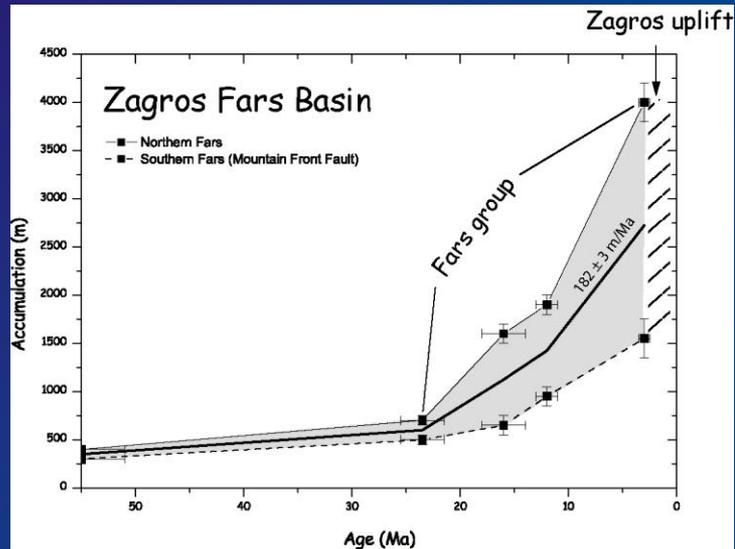
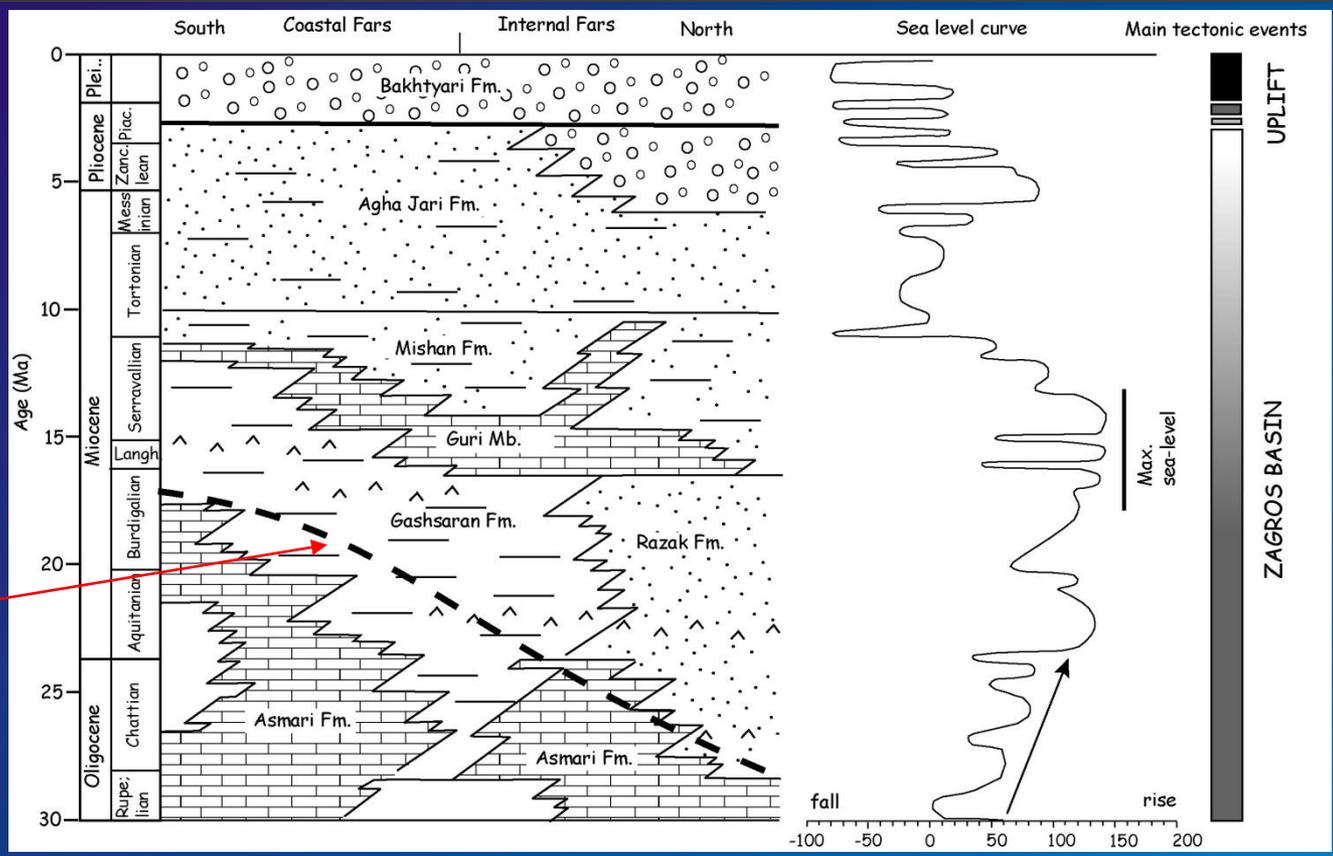
**Paleocene-Eocene-
Oligocene**

Maestrichtian

< 1 km
1-3 km
1-2 km
0.5 km
1-3 km

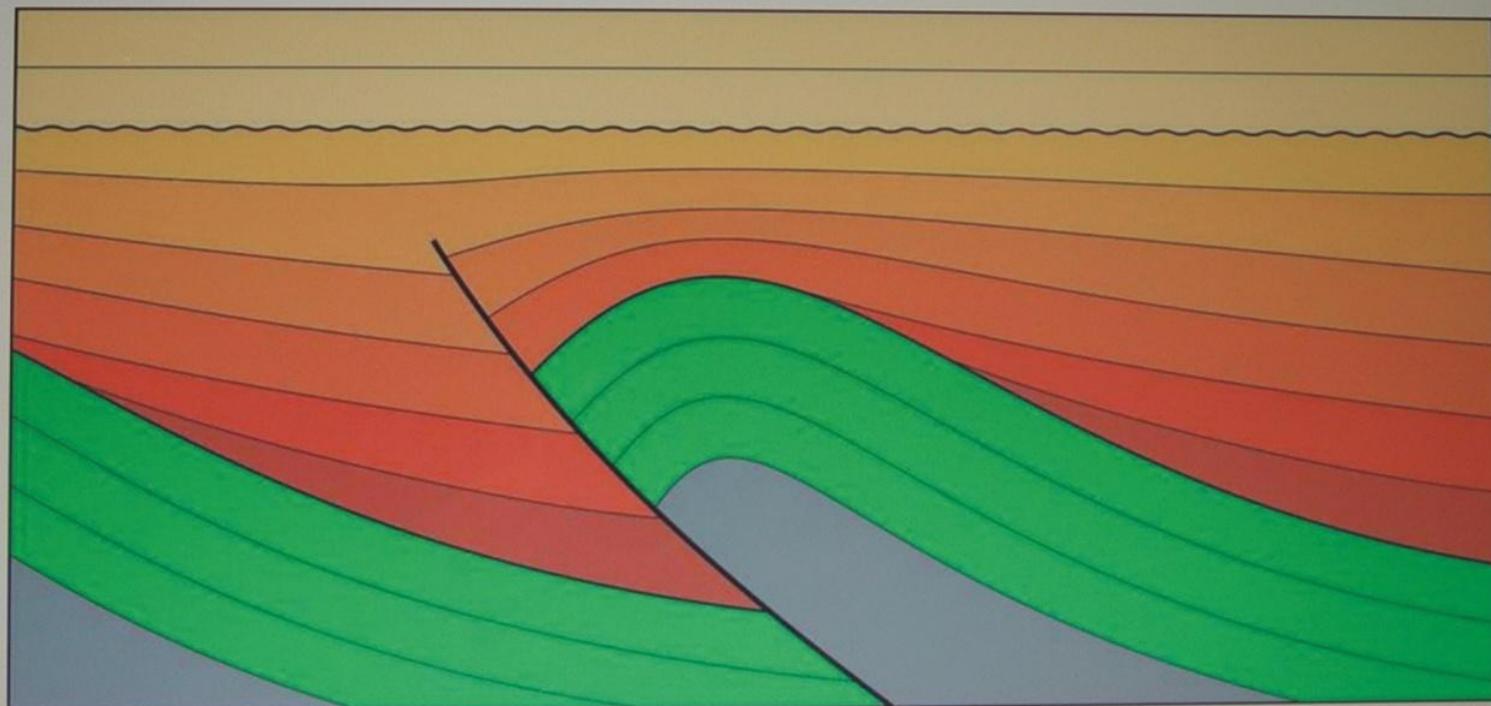
Main decollement within the infra-Cambrian/Cambrian Hormuz evaporites

Progressive southward onlap through time of the shallowing-upward synorogenic deposits (Razak-Gashsaran Fm) onto the carbonates of the Asmari Fm in the context of flexural basin development.



Upper Miocene : growth strata within upper Agha Jari Fm

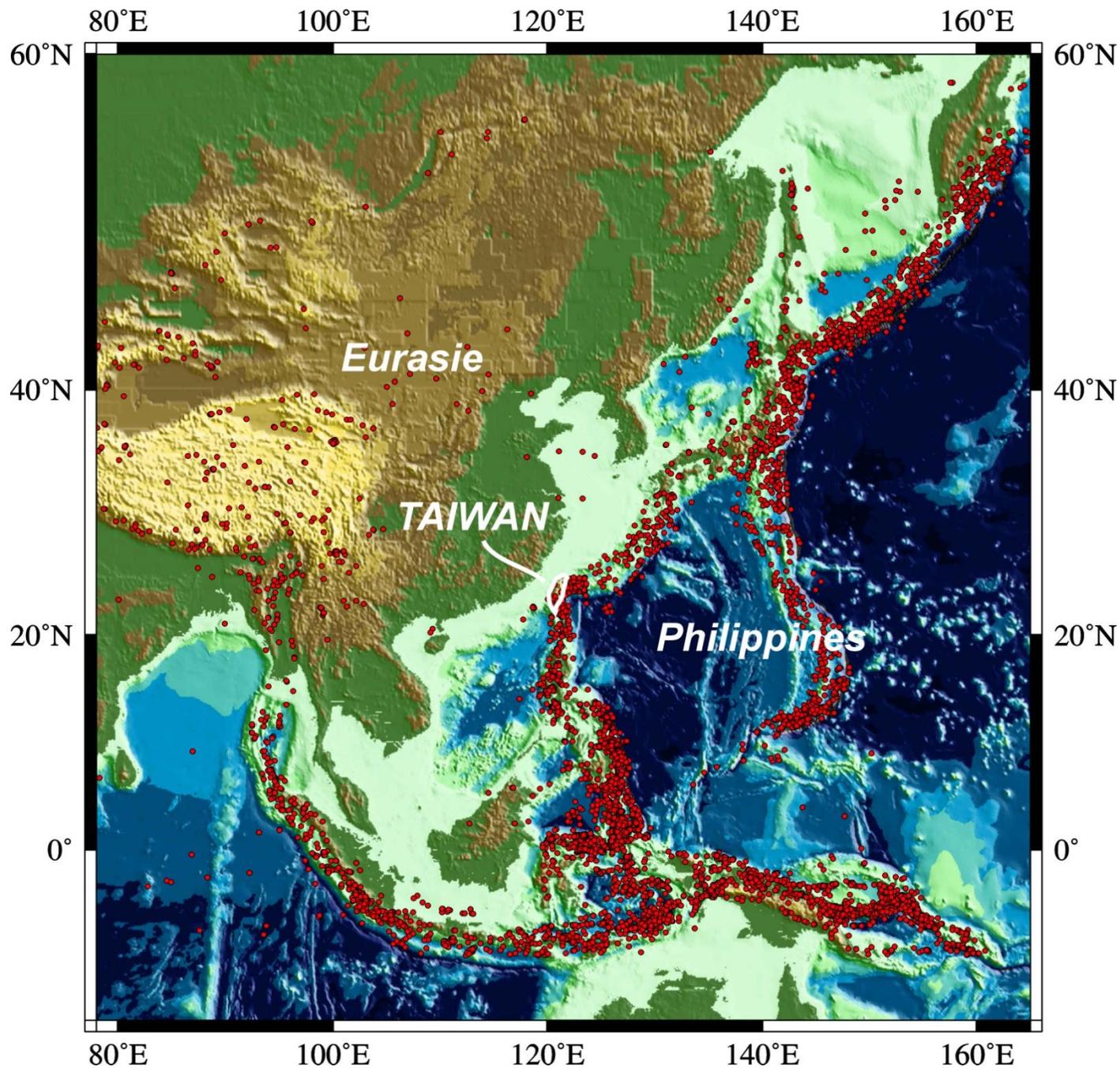




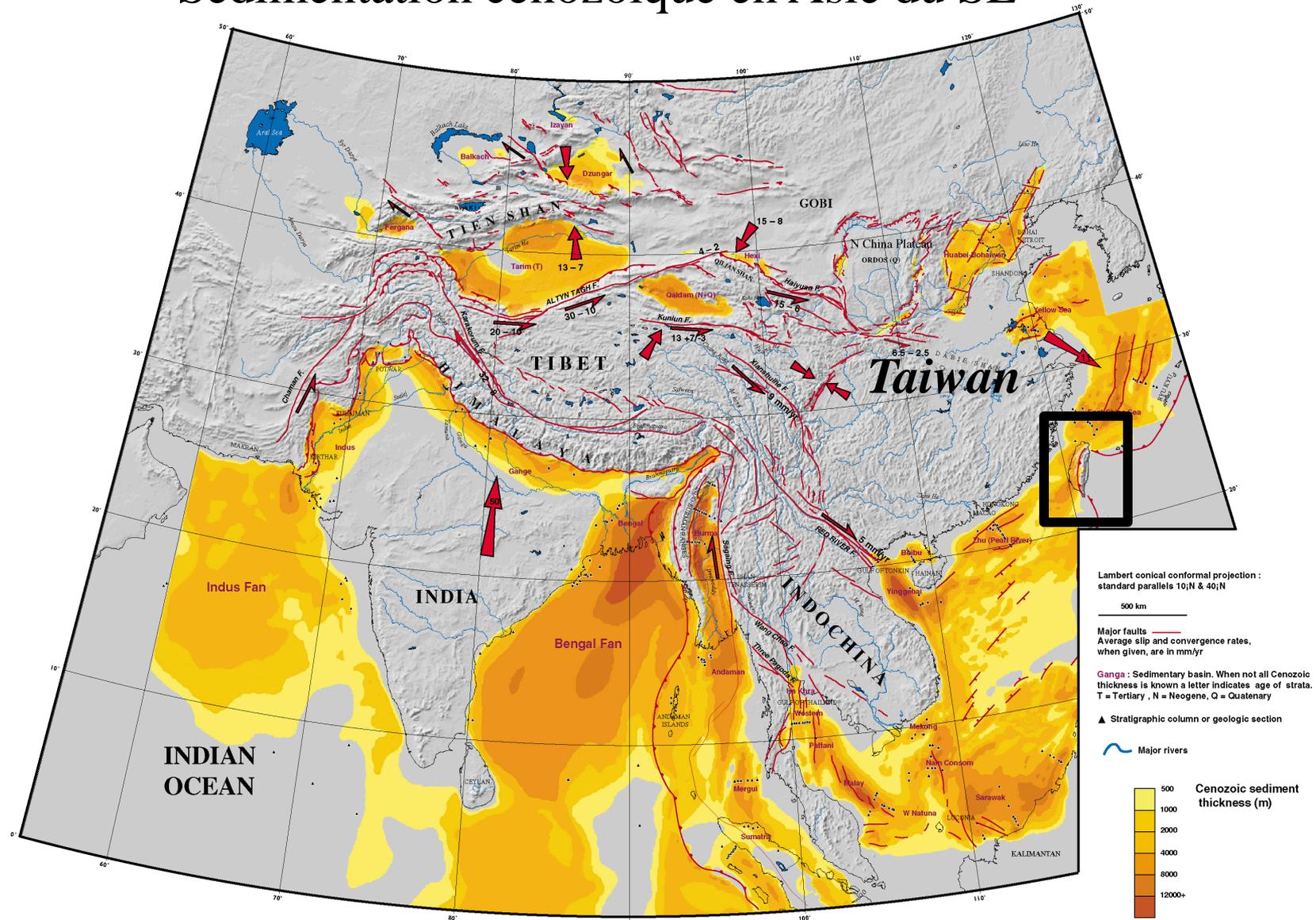
■ Dépôts anté-déformation ■ Dépôts syn-déformation ■ Dépôts post-déformation

Taiwan

Contexte
géodynamique
en Asie du SE



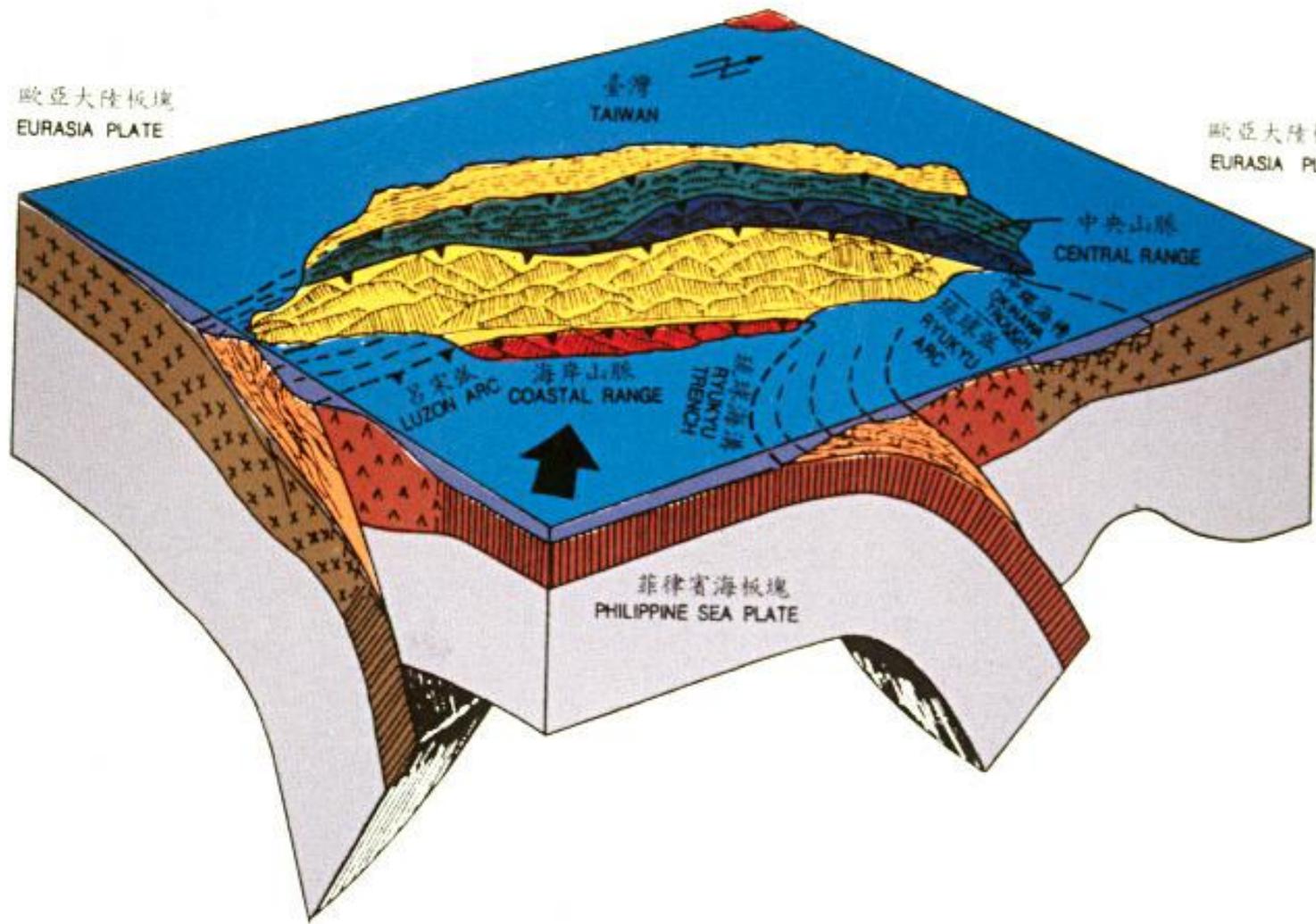
Sédimentation cénozoïque en Asie du SE



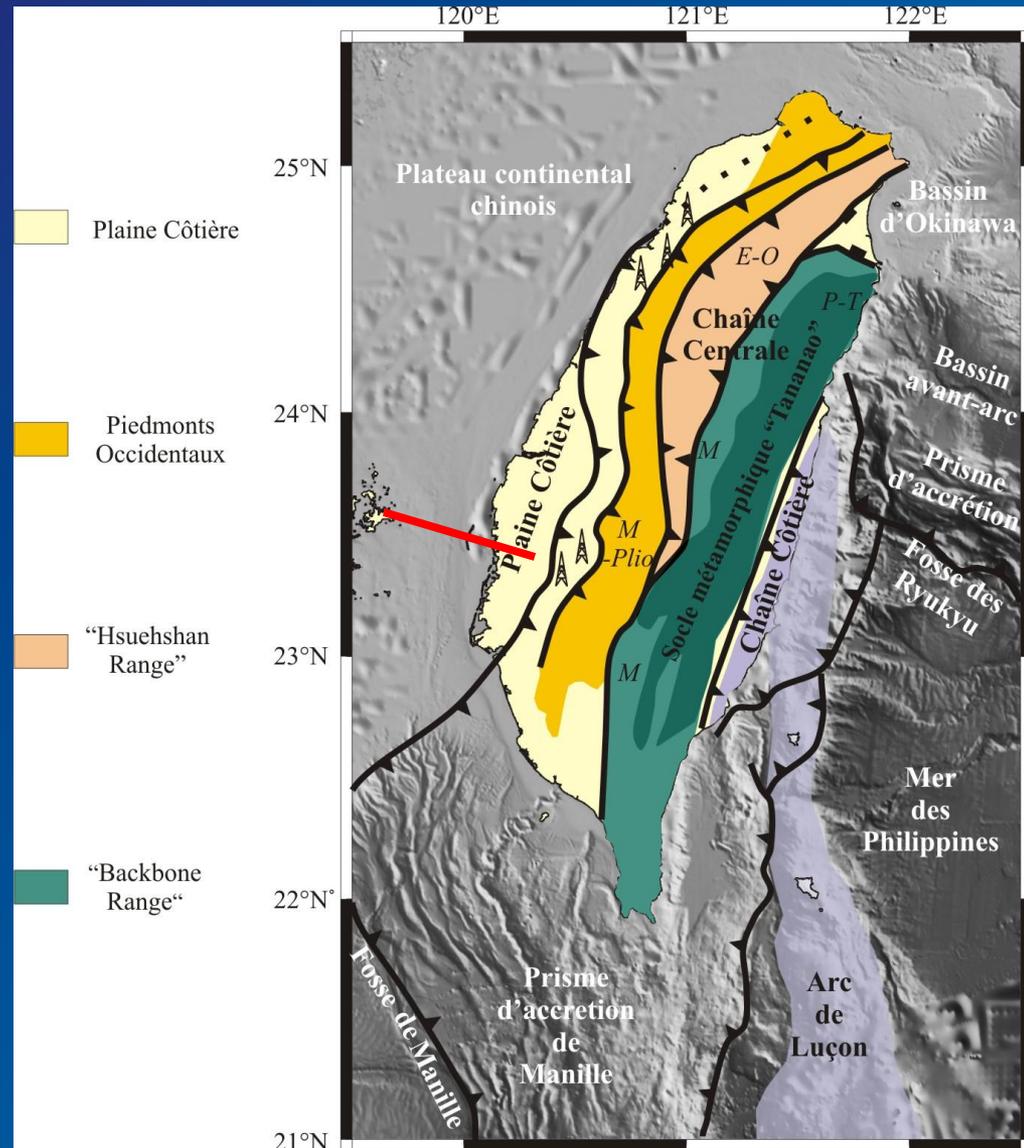
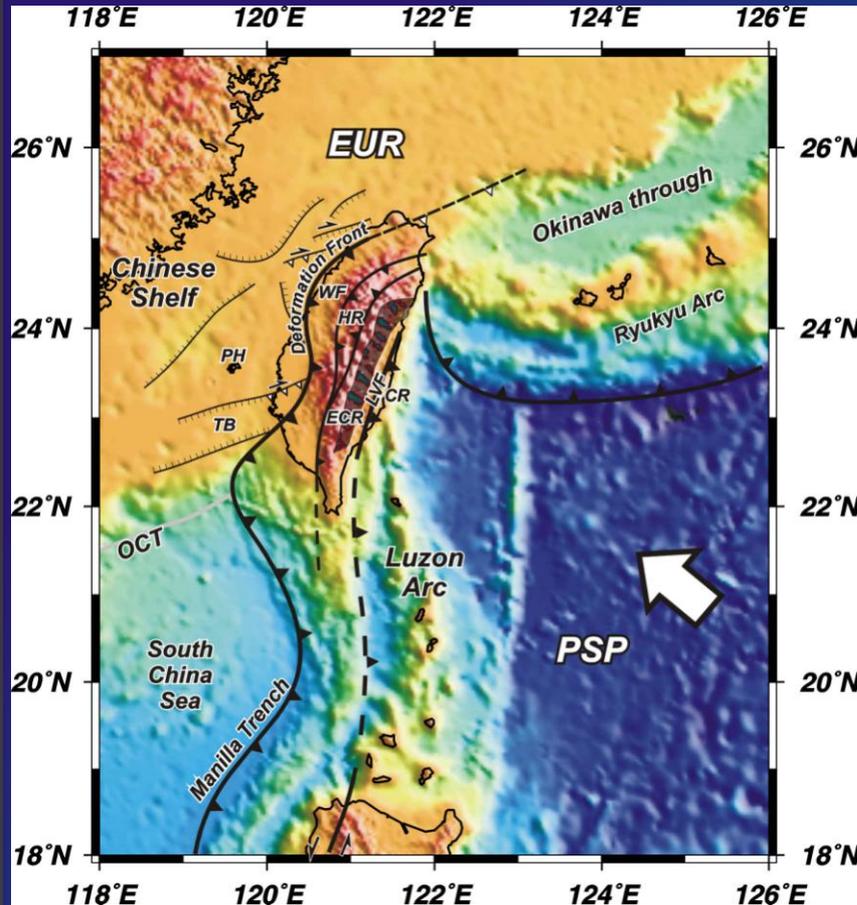
Métivier et al., GJI, 1999

歐亞大陸板塊
EURASIA PLATE

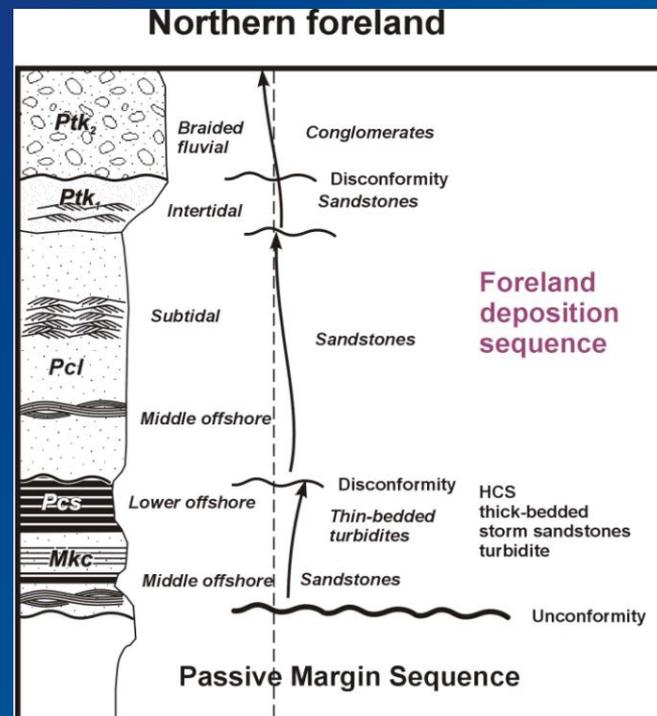
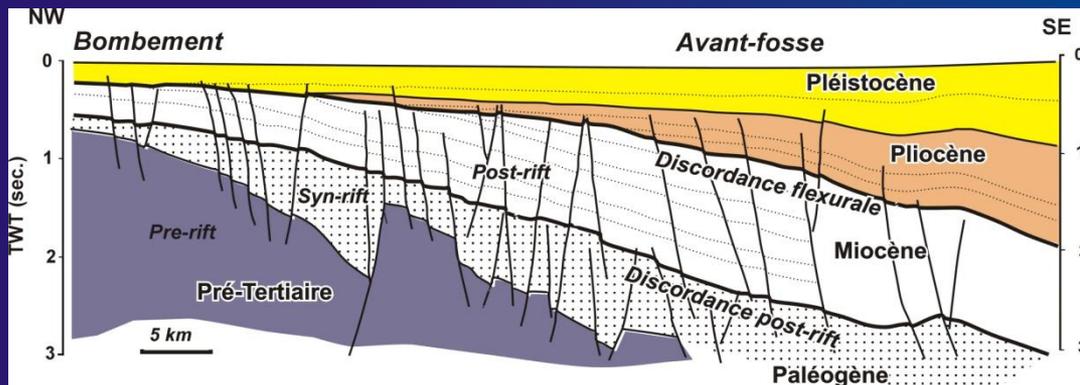
歐亞大陸板塊
EURASIA PLATE



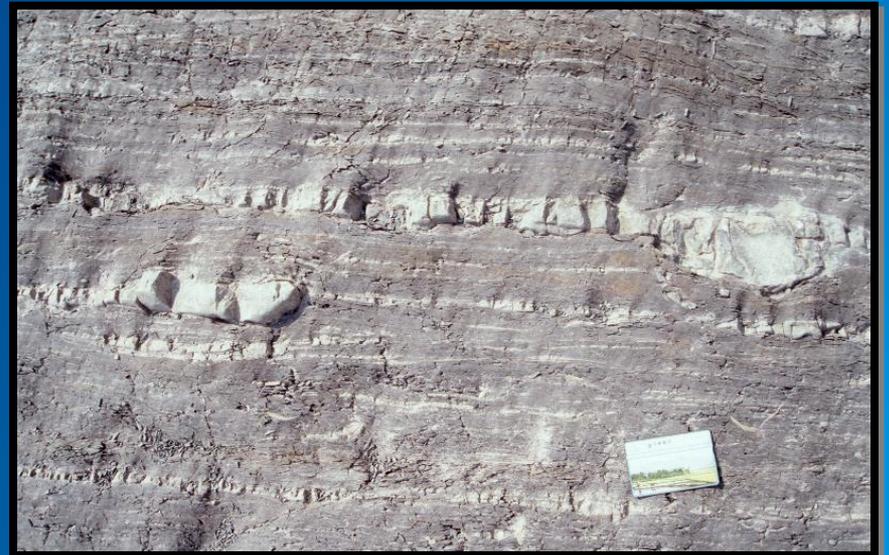
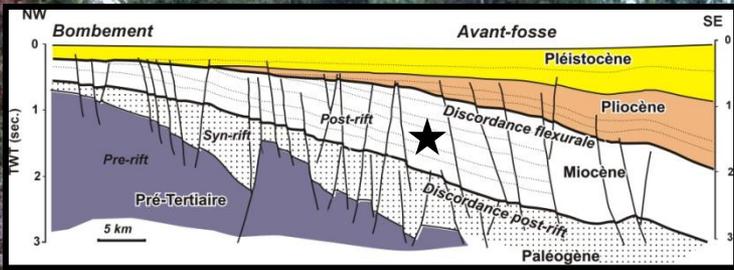
Taiwan : une chaîne de collision arc insulaire-marge continentale



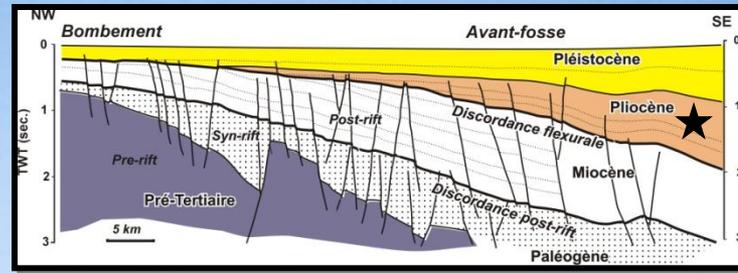
Séquences de dépôt de l'avant-pays



Sédimentation turbiditique miocène pré-orogénique



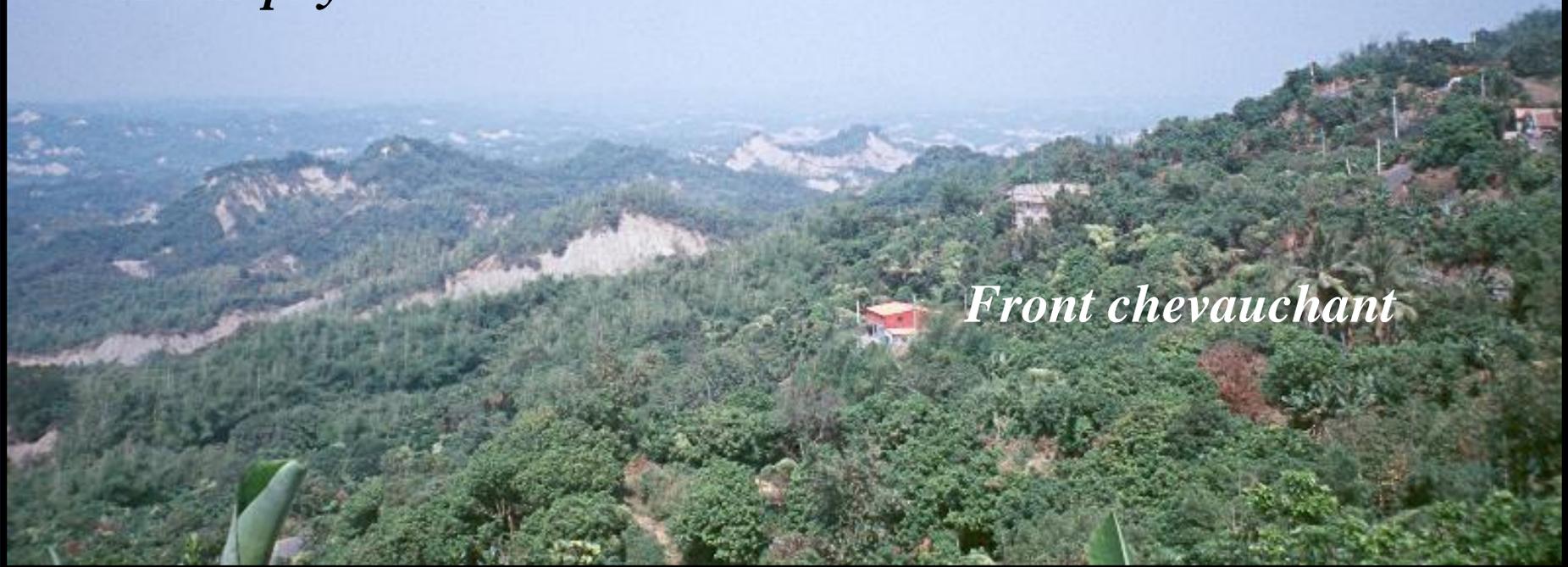
*Marnes offshore et turbidites du Pliocène
base des séquences synorogéniques*



W

E

Avant-pays



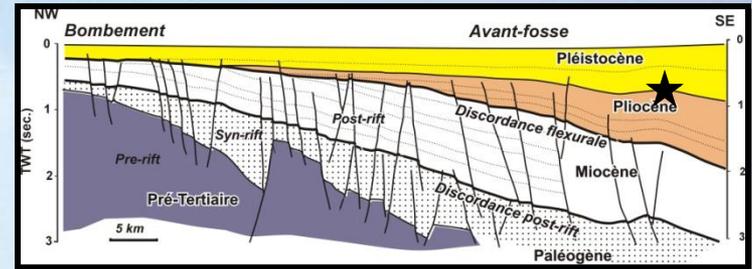
Front chevauchant

Dépôts tidaux du Pliocène

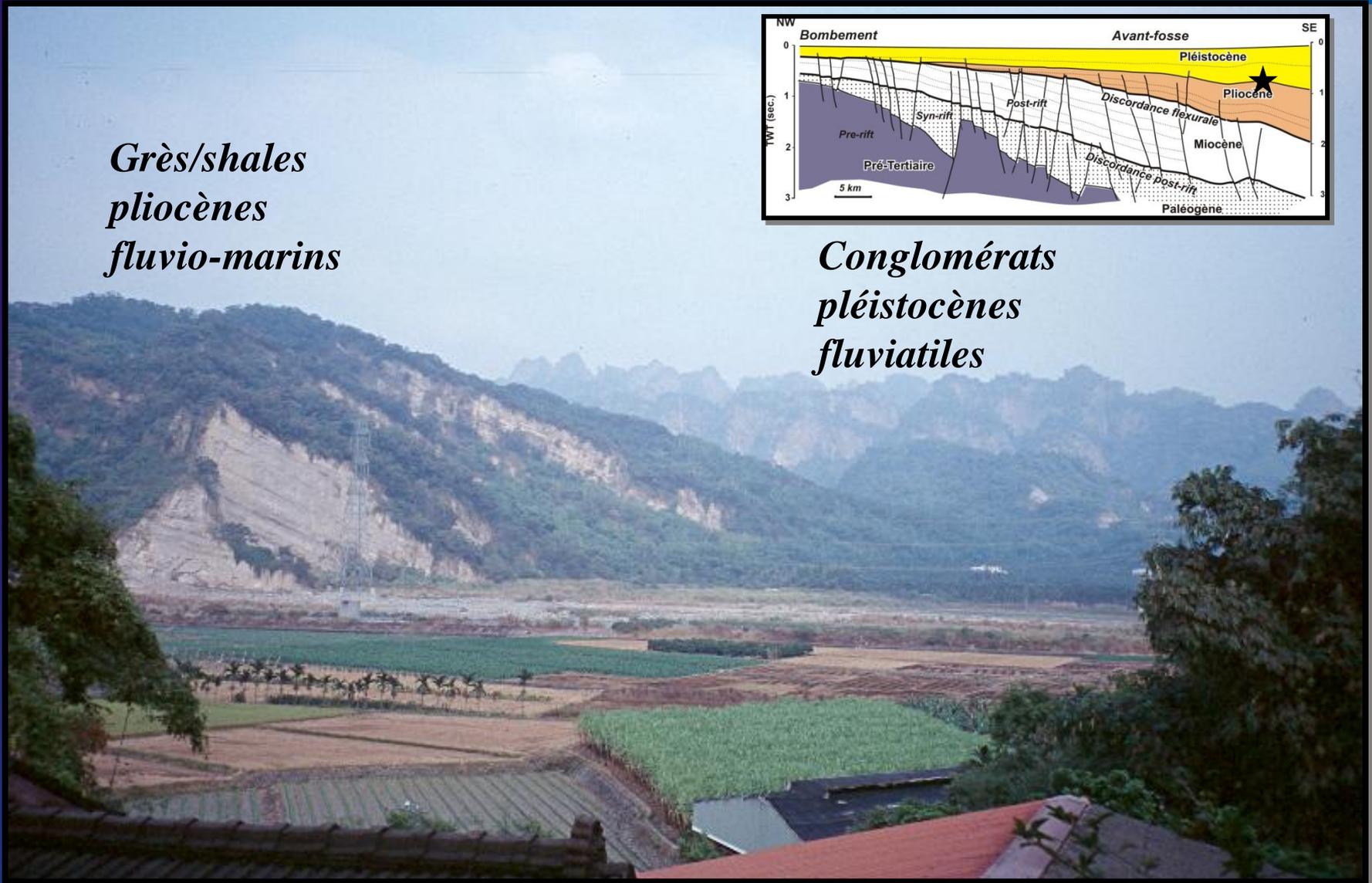


Transition vers des dépôts deltaïques, fluviomarins à fluviaux

*Grès/shales
pliocènes
fluviomarins*



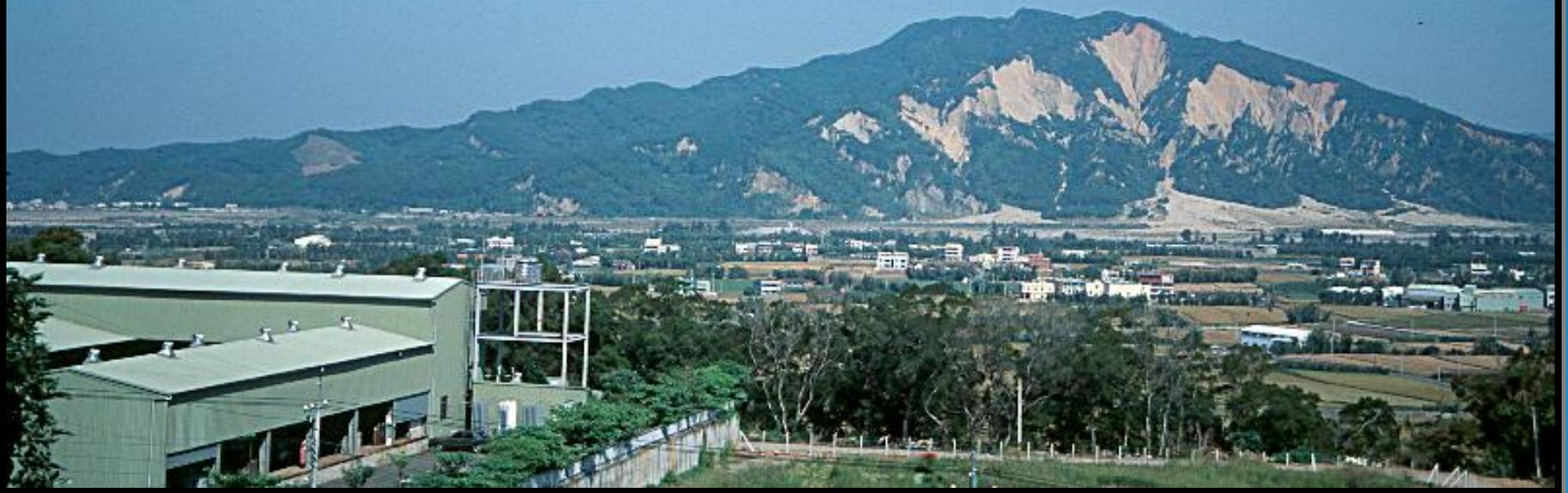
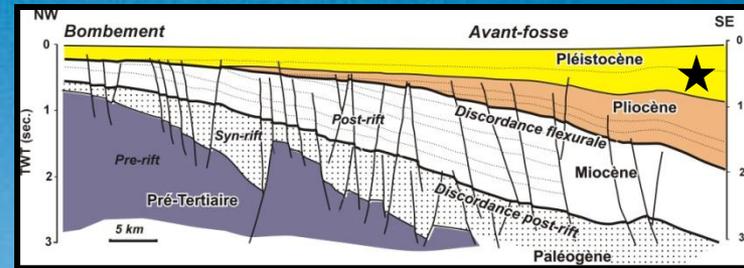
*Conglomérats
pléistocènes
fluviaux*

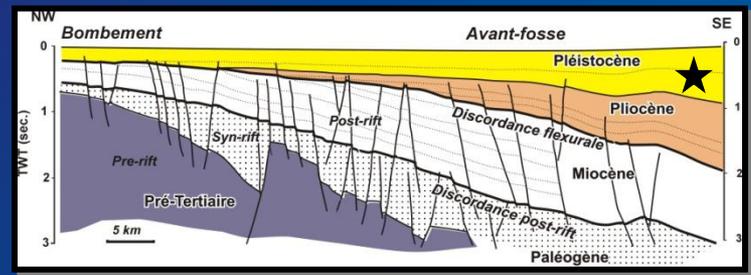


Anticlinaux frontaux composés de conglomérats pléistocènes

W

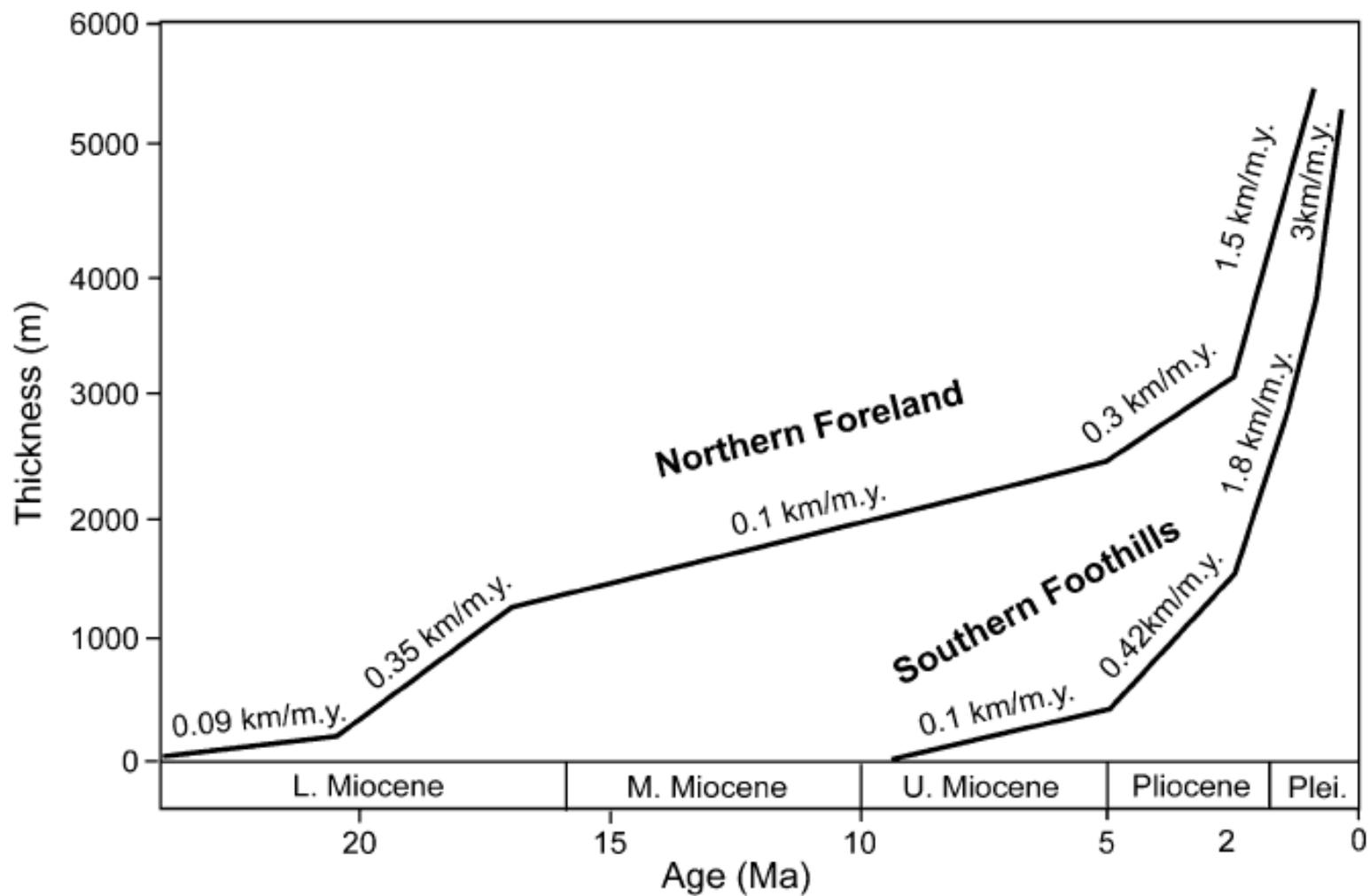
E

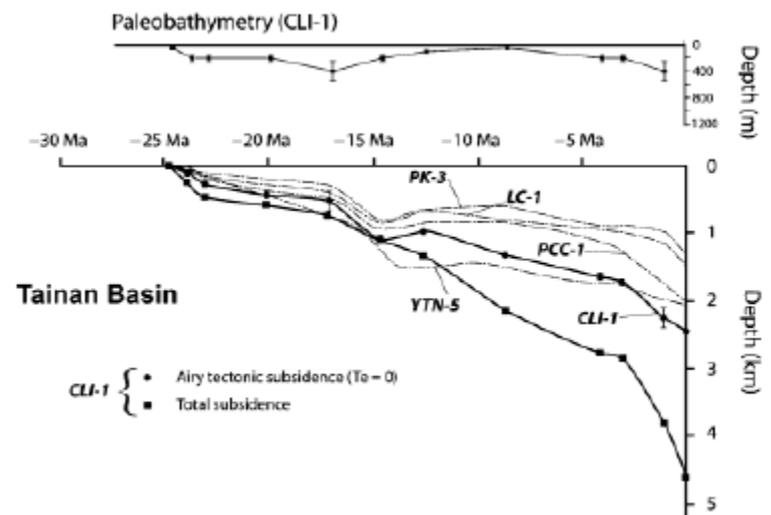
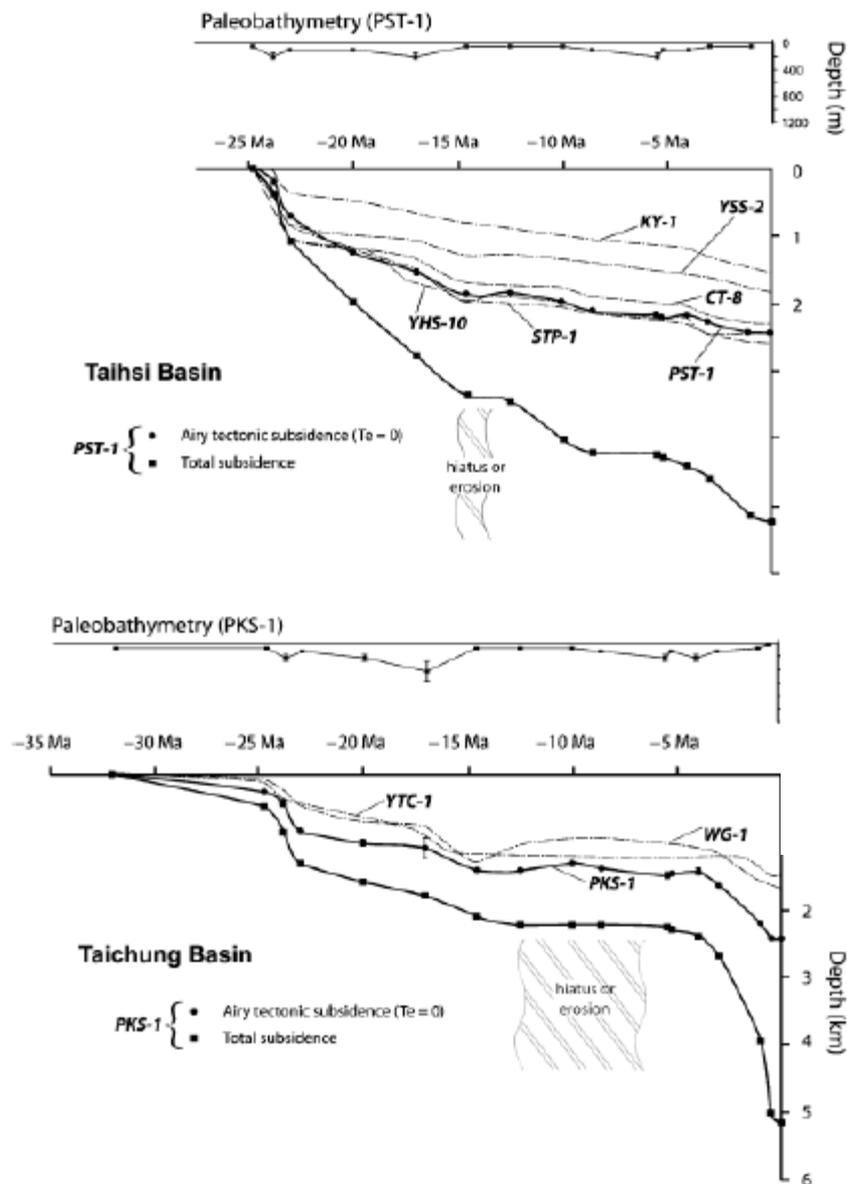




Jusqu'à 2 km de conglomérats accumulés dans l'avant-pays au Pléistocène

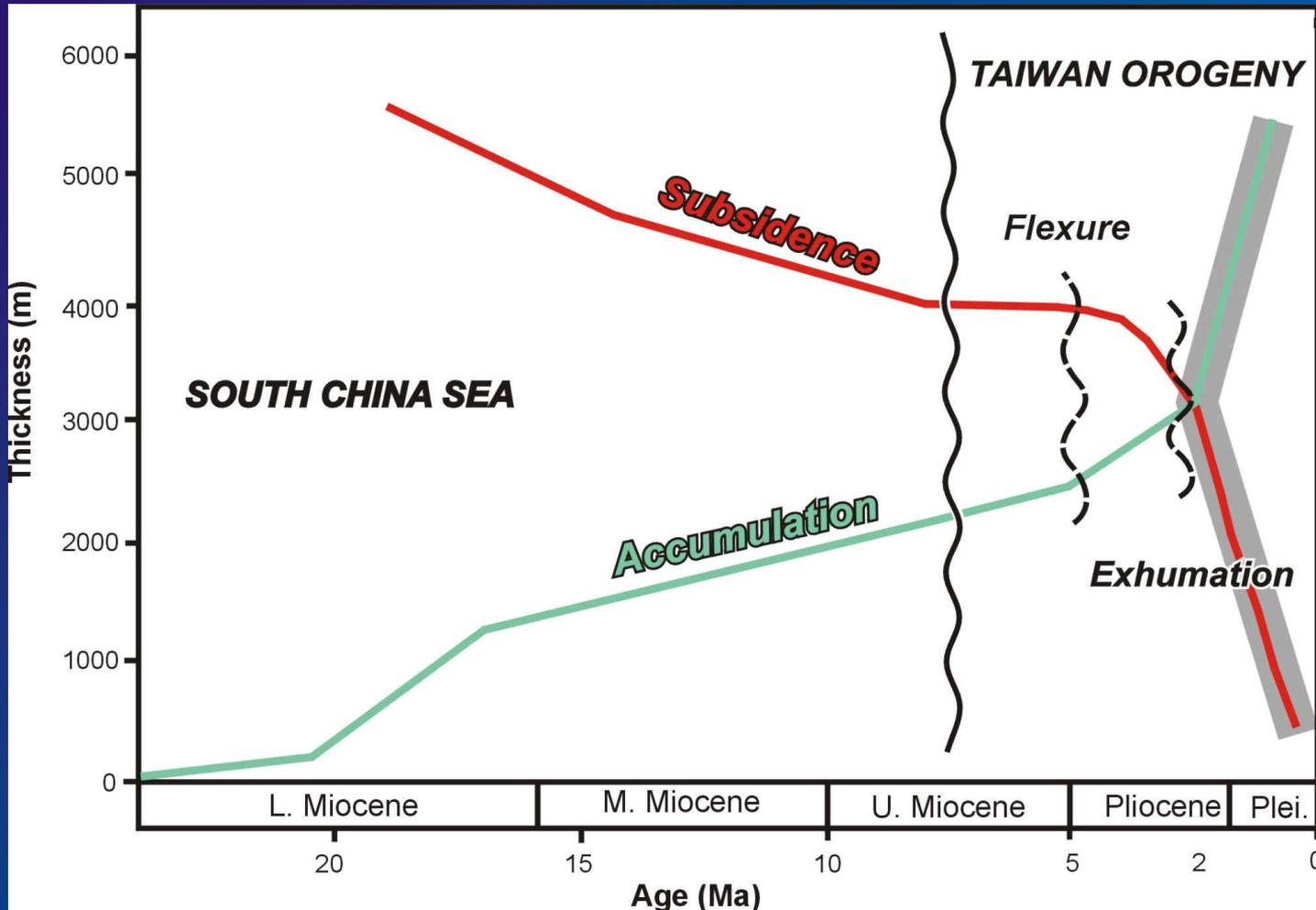




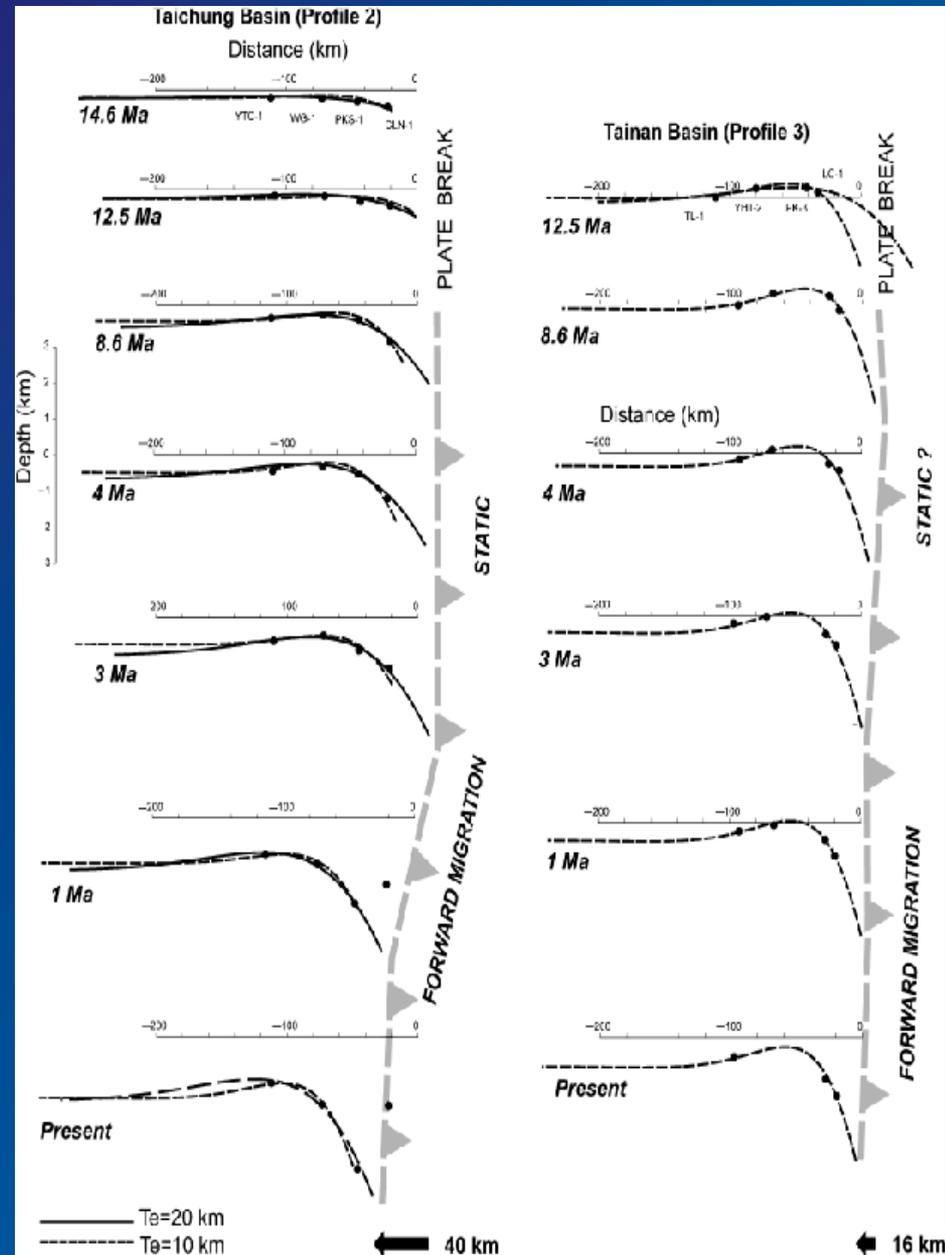


(d'après Tensi et al., BR)

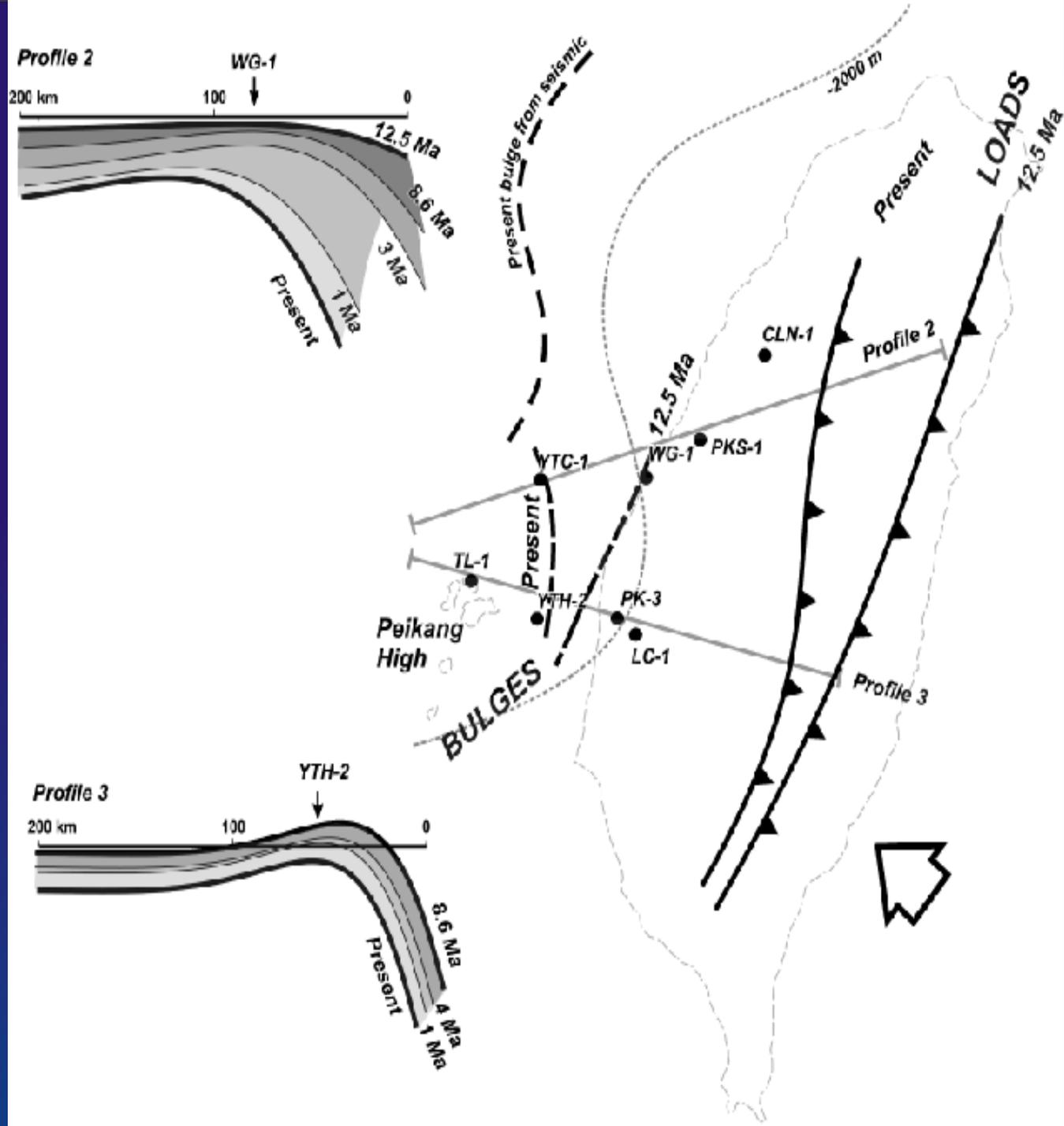
Subsidence tectonique et accumulation sédimentaire dans le bassin d'avant-pays depuis le Miocène



Modélisation de la flexure du bassin d'avant-pays de Taiwan



(d'après Tensi et al., BR)



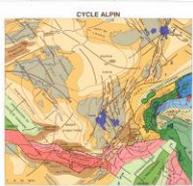
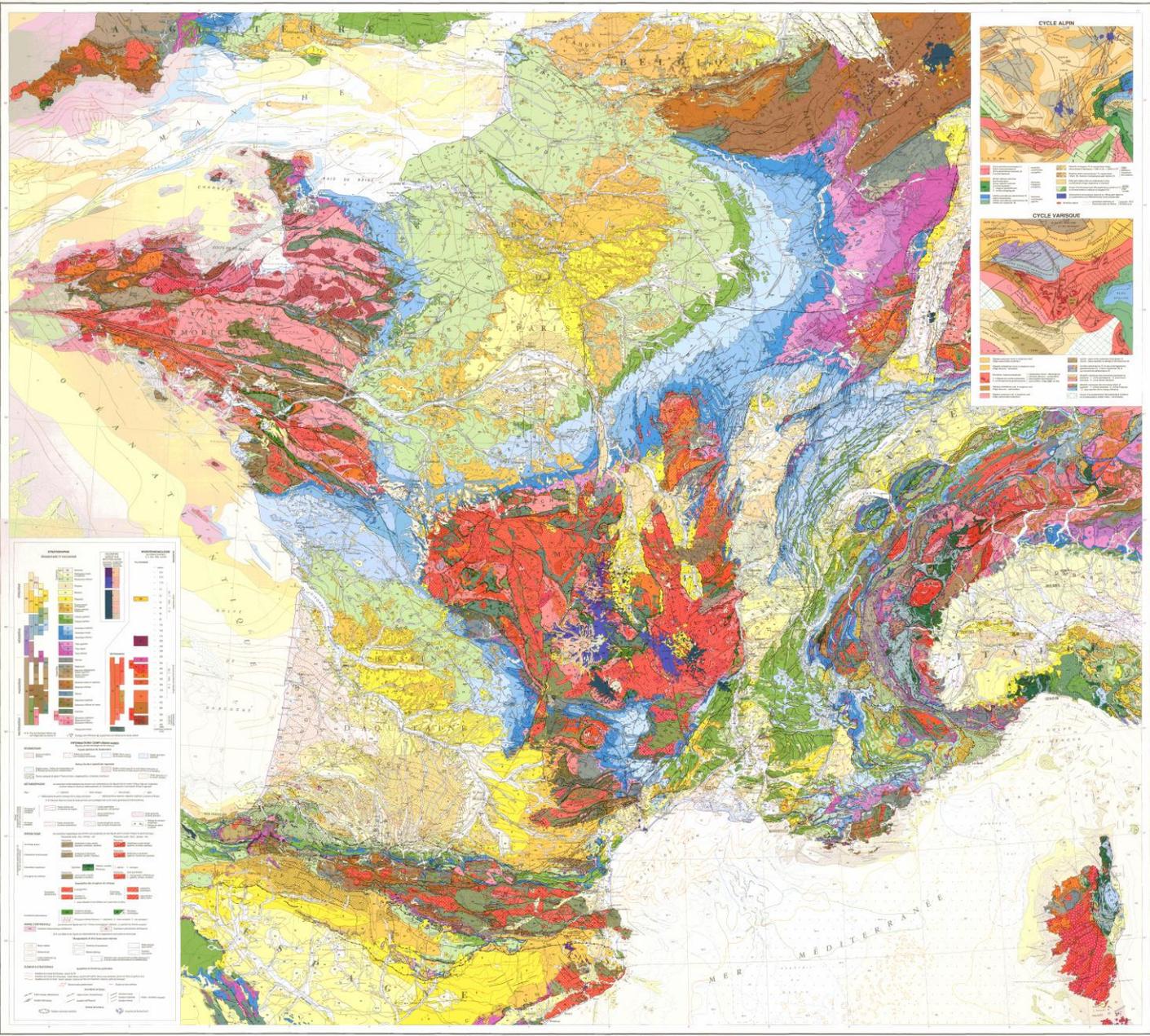
(d'après Tensi et al., BR)

Les Pyrénées

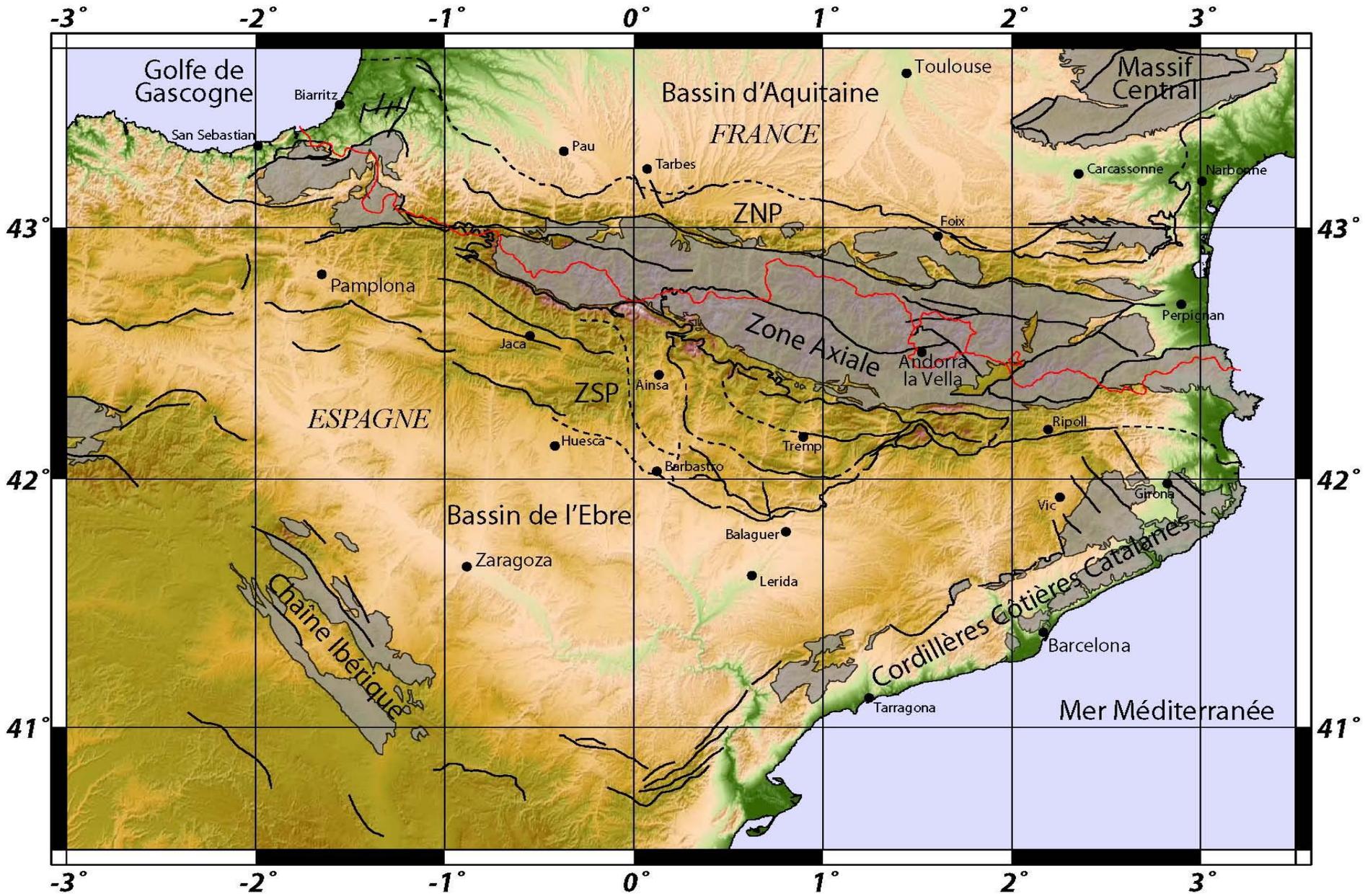
CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

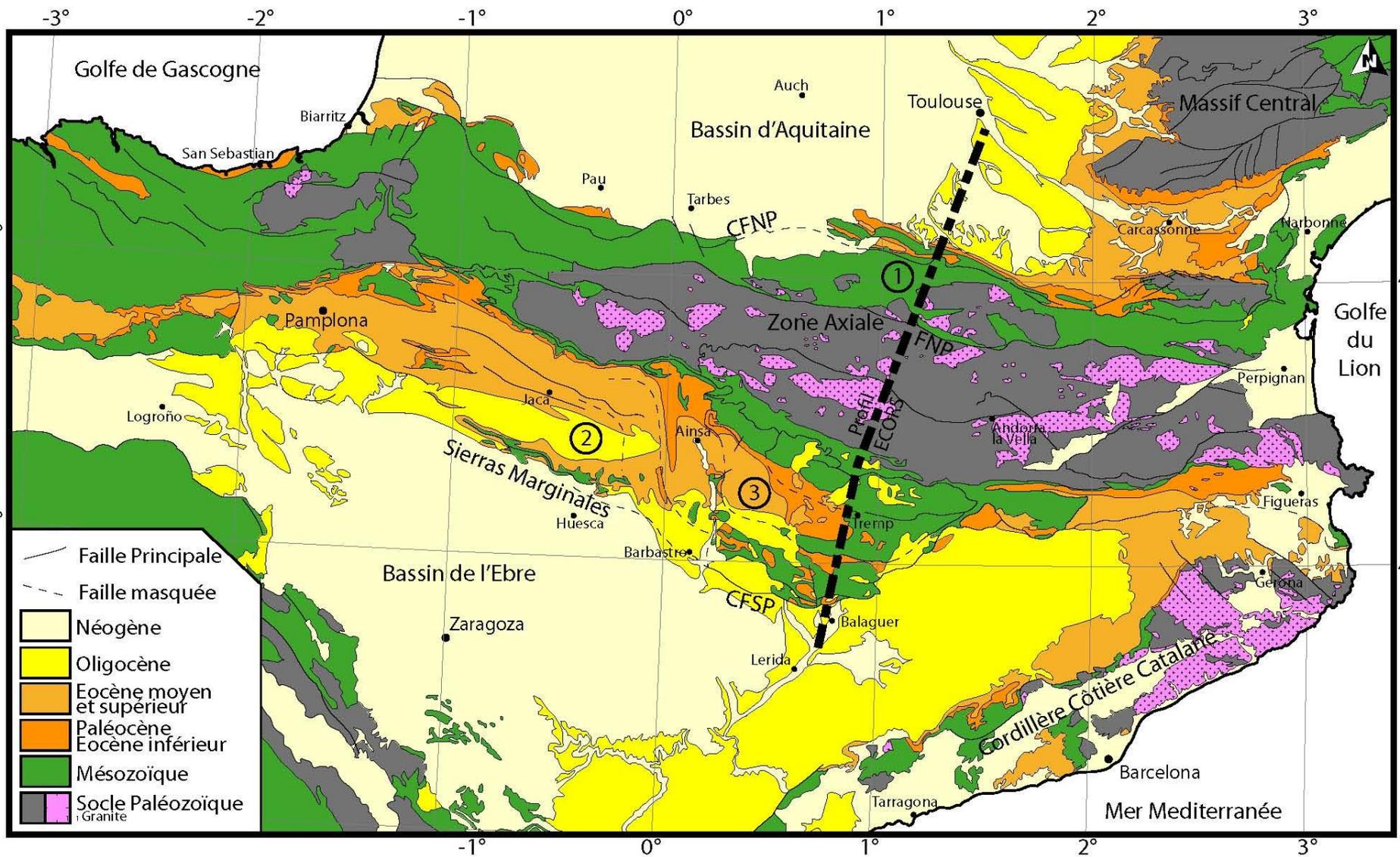
à l'échelle du millionième
0^e édition

BRGM BRITANNIC GEOLOGICAL SURVEY
 3, AVENUE DE LA LIBÉRIÉ, 91000 EVRY-COURCOURONNES
 TEL: 01 39 70 76 00 FAX: 01 39 70 76 01
 WWW.BRGM.FR WWW.BGS.AC.UK



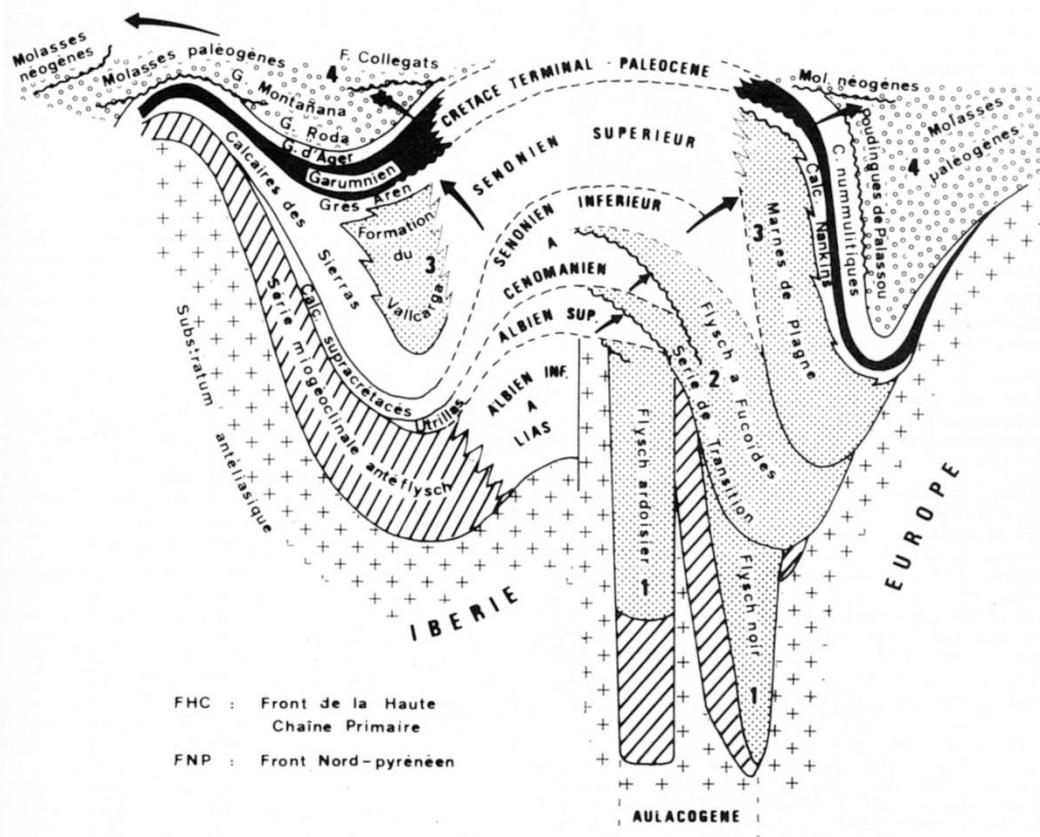
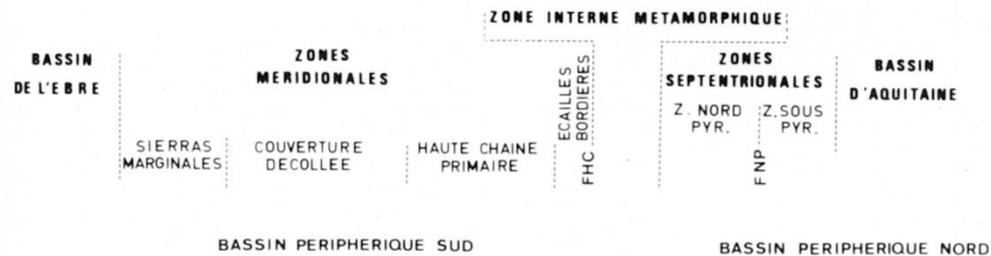
CONVENTIONS
 Les couleurs indiquent les unités géologiques. Les symboles indiquent les structures géologiques. Les lignes pointillées indiquent les limites des unités géologiques. Les lignes pleines indiquent les limites des structures géologiques. Les lignes tirets indiquent les limites des unités géologiques. Les lignes tirets pointillés indiquent les limites des structures géologiques.







Quatre courbes de subsidence dans le bassin Aquitain, calculées d'après l'analyse de forages de recherche pétrolière. Dans chaque encadré, la courbe inférieure montre l'enfouissement avec le temps du socle anté-triasique (sédiments décompactés), la courbe supérieure montre la subsidence « tectonique », c'est-à-dire la subsidence corrigée de l'effet de charge des sédiments et de l'eau emplissant le bassin (compensation isostatique locale par du matériel mantellique de densité 3, 2). La subsidence est rapide au Trias et au Lias inférieur (distension initiale), ralentie pendant le Jurassique moyen (refroidissement lithosphérique), de nouveau rapide au Jurassique supérieur, puis à l'Albo-Aptien (nouvelles phases de distension tectonique), ralentie au Crétacé supérieur (nouveau refroidissement lithosphérique), et reprend brusquement à la fin du Crétacé jusqu'à la fin de l'Éocène (effet de la compression pyrénéenne). Des différences apparaissent cependant selon les puits, qui ne montrent pas tous les trois phases de subsidence rapide énumérées précédemment. Les bassins du Crétacé inférieur (Parentis, Mirande, Adour ; sont ombrés (d'après BRUNET, 1983 ; coordonnées en grades).

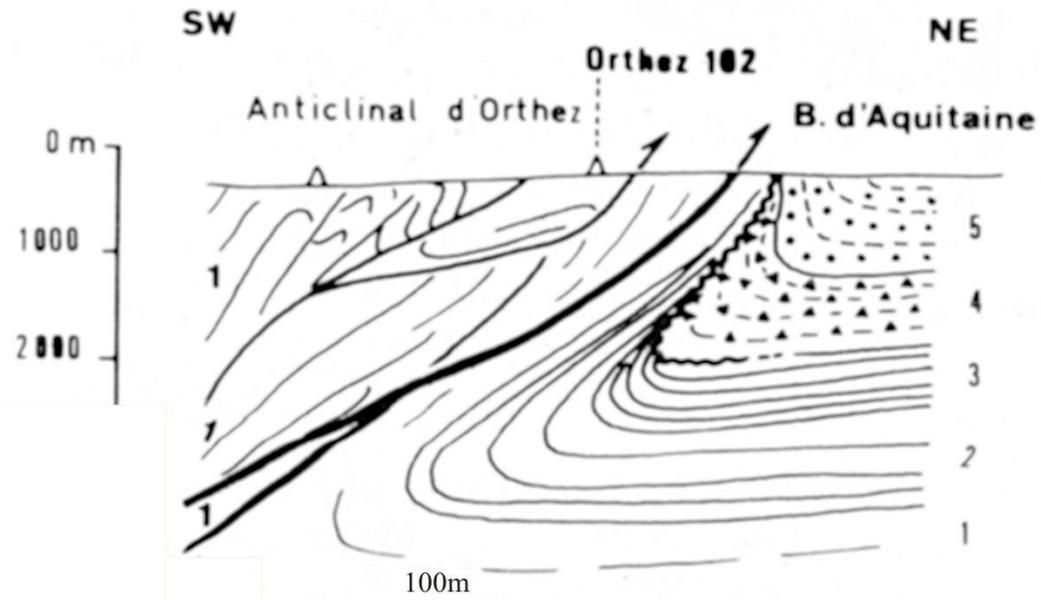


Principales séries synorogéniques des Pyrénées sur une transversale navarro-languedocienne.

Le schéma illustre les situations tectoniques, faciès, variations d'épaisseurs, relations et significations tecto-sédimentaires.

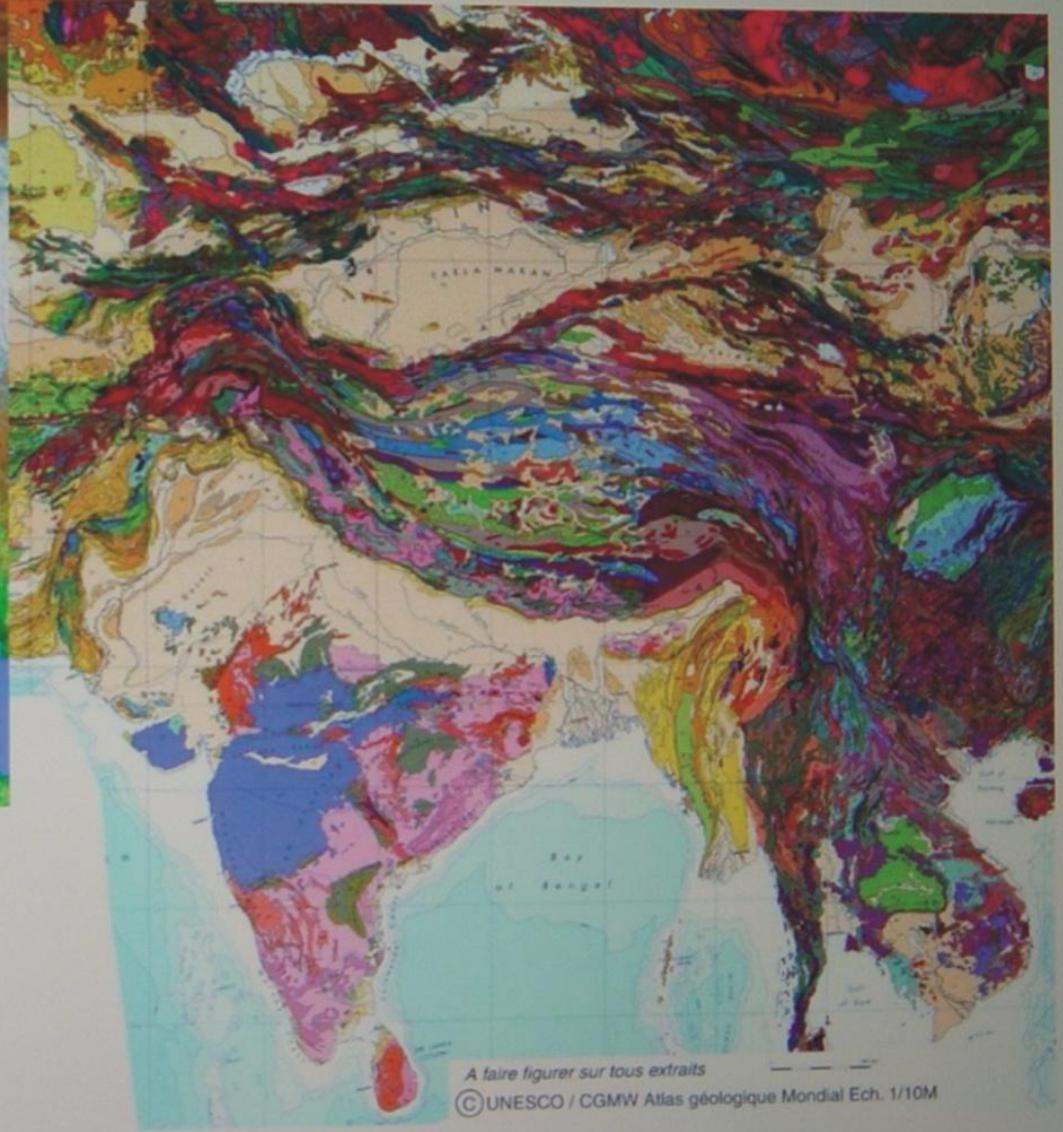
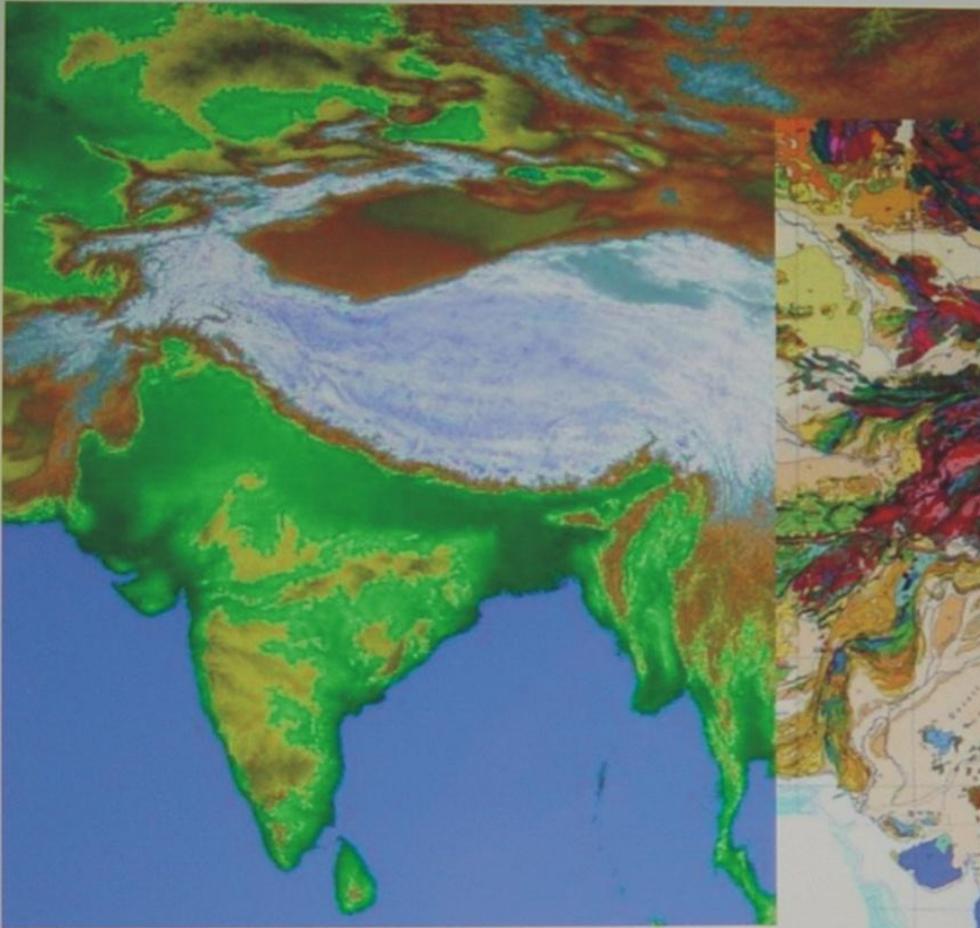
Stade aulacogène : séries à turbidites du Crétacé moyen (1) en position intercratonique dans un rift sur des ensembles miogéoclinaux antéflysch très érodés.

Stade bassins périphériques (postcollision cratonique) : migration des dépôts en avant des deux fronts orogéniques actifs (flèches), pour les séries à turbidites du Cénomanién au Sénonien inférieur (2), les séries à turbidites et littorales du Sénonien supérieur (3), les séries fluvio-continetales du Paléogène (4).

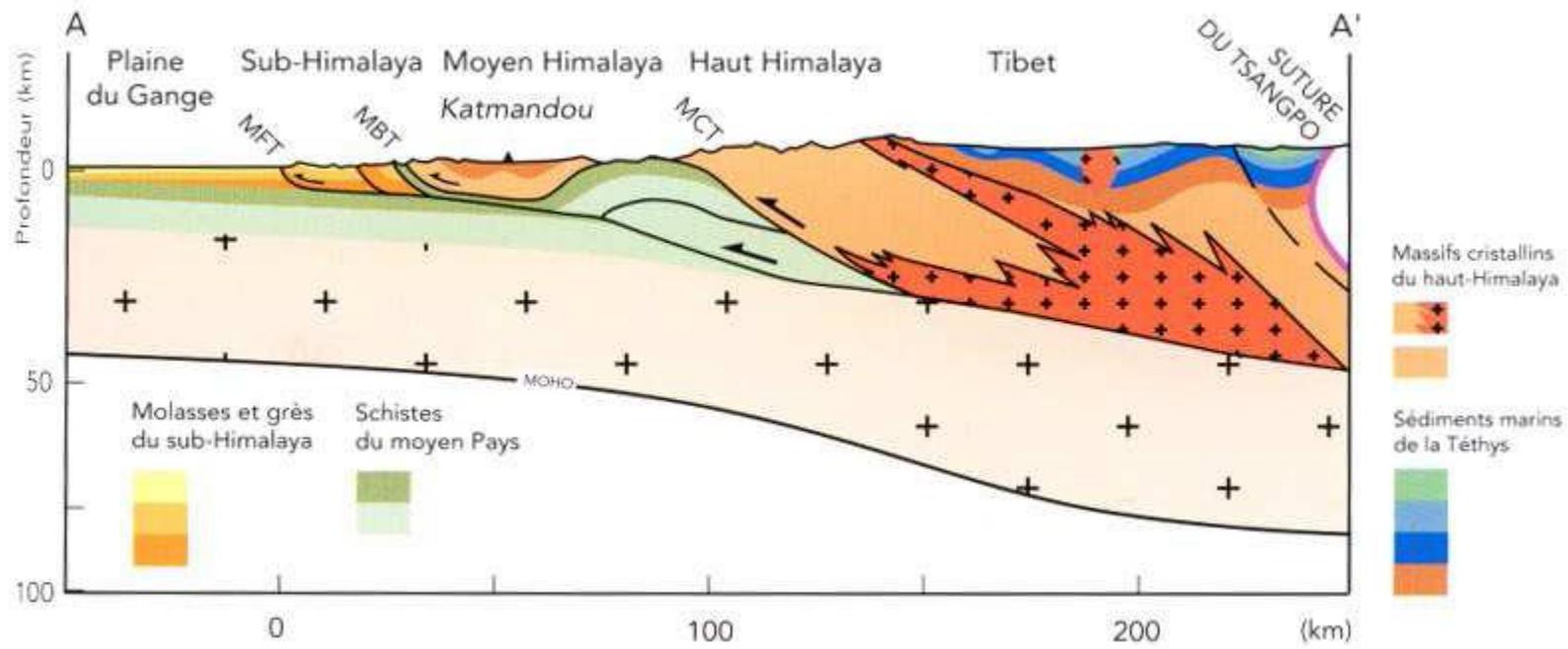


Discordance et sédimentation syntectoniques au niveau de l'anticlinal d'Orthez chevauchant un avant-pays aquitain relevé et renversé (d'après J. Henry, 1966). Les terrains plissés du Trias au Néocrétacé (1), du Paléocène (2) et de l'Eocène inférieur (3) marins sont suivis, le long d'une discordance progressive et angulaire, par un prisme de dépôts synorogéniques, encore marins à l'Eocène moyen (4), puis fluvio-continentaux de l'Eocène supérieur au Miocène (5).

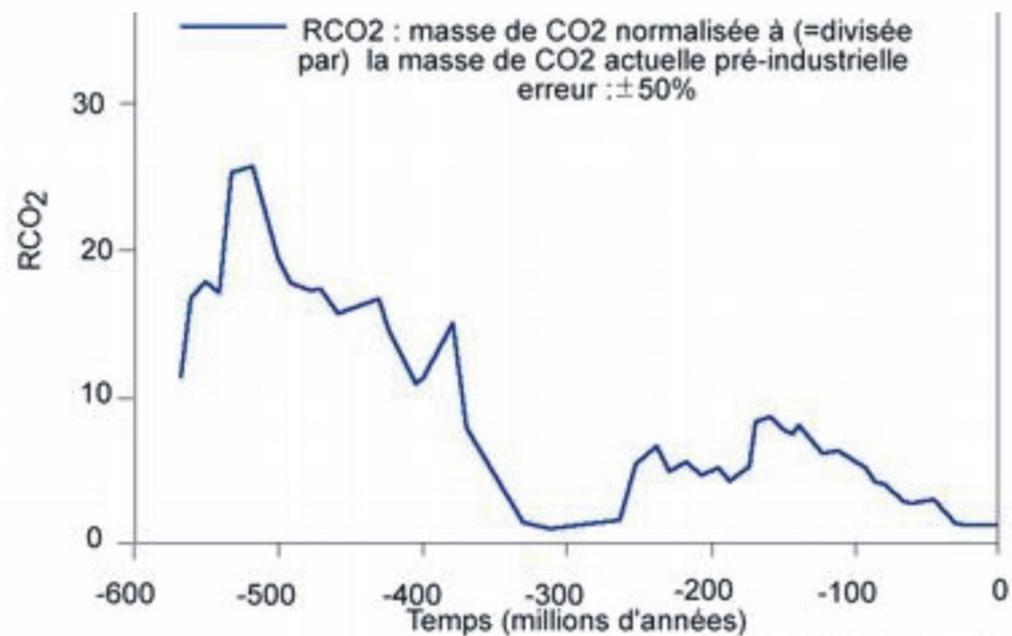
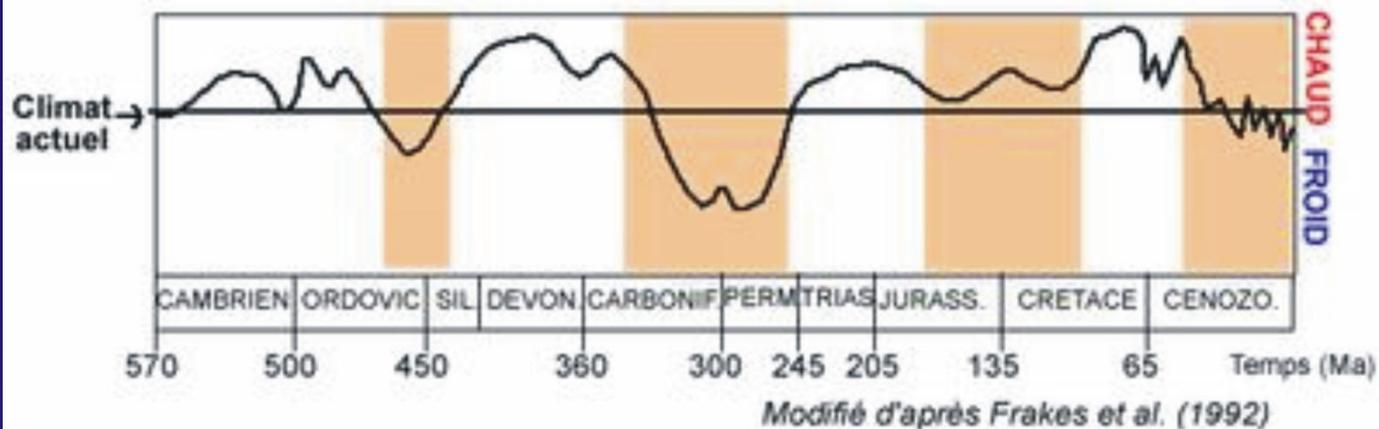
L'Himalaya



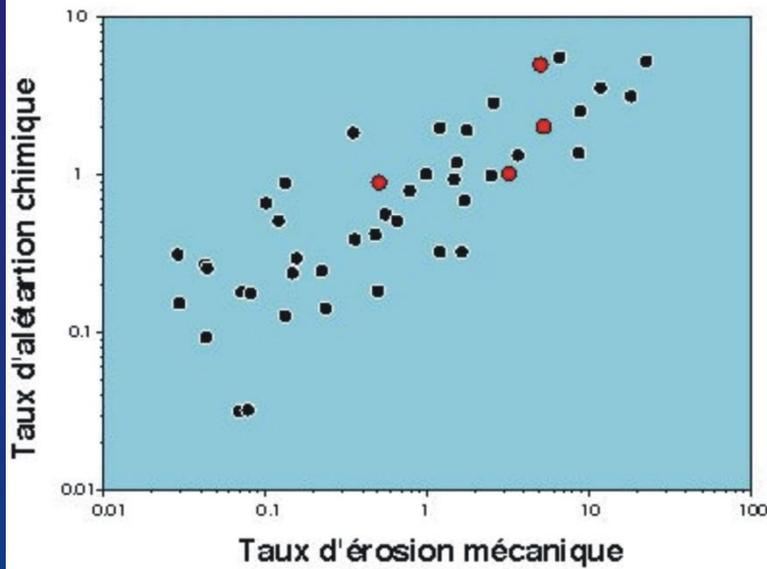
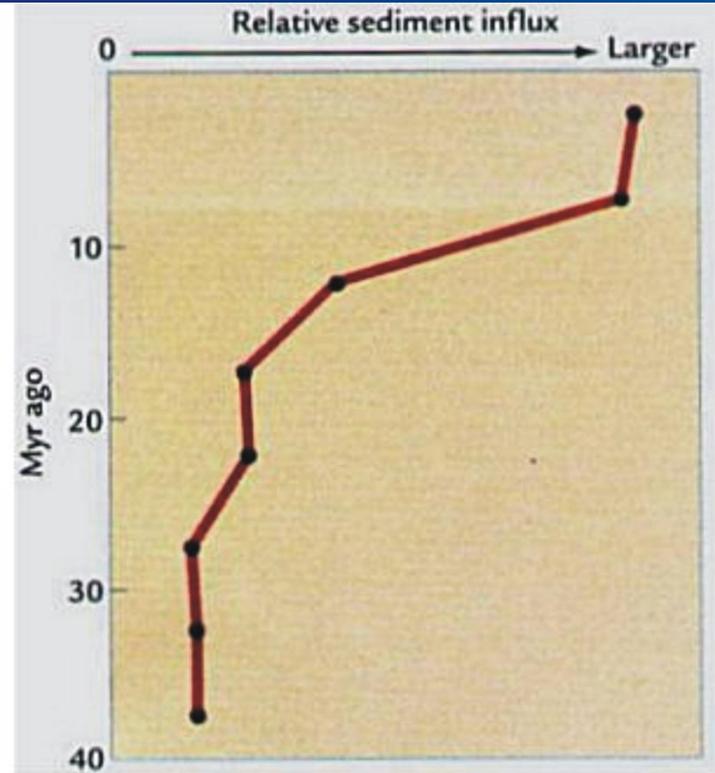
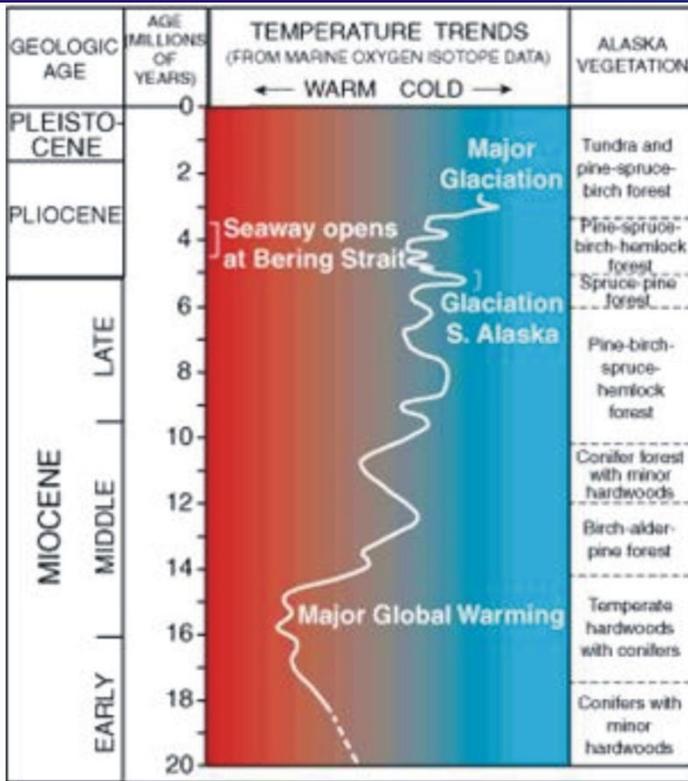
A faire figurer sur tous extraits
© UNESCO / CGMW Atlas géologique Mondial Ech. 1/10M



(d'après Guillot)



Berner R.A., 2003, Nature 426.

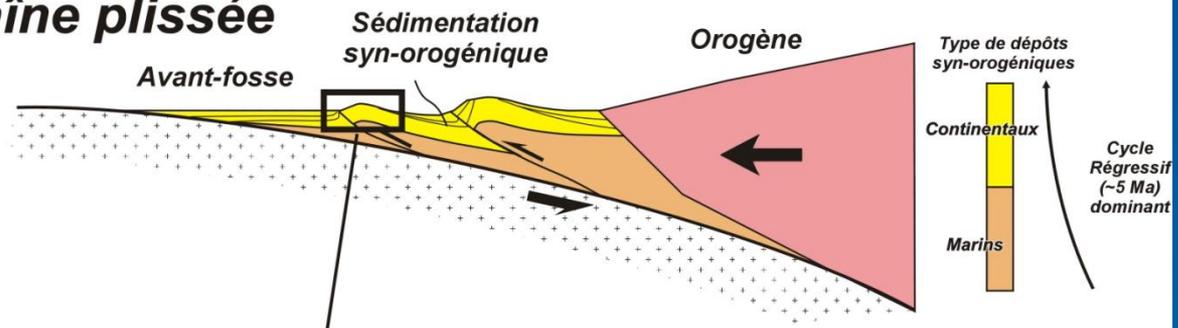


Formation de l'Himalaya depuis 15Ma
 Taux moyen d'ablation des hauts reliefs : 1mm/an
 Quantité de silicates calciques dans la croûte continentale : 2%
 Densité moyenne des roches : 3000 Kg/m³
 Quantité de CO₂ atmosphérique : 750 Gt de C soit 2750 Gt de CO₂
 La masse de CO₂ consommé correspond à 78% de la masse des silicates calciques altérés.

Avec une estimation de la surface de l'Himalaya de 700000km², calculer la consommation de CO₂ atmosphérique depuis le début de la surrection himalayenne et la comparer à la teneur atmosphérique actuelle en CO₂.

**Les structures internes du bassin,
la compétition entre surrection des plis et subsidence**

La chaîne plissée

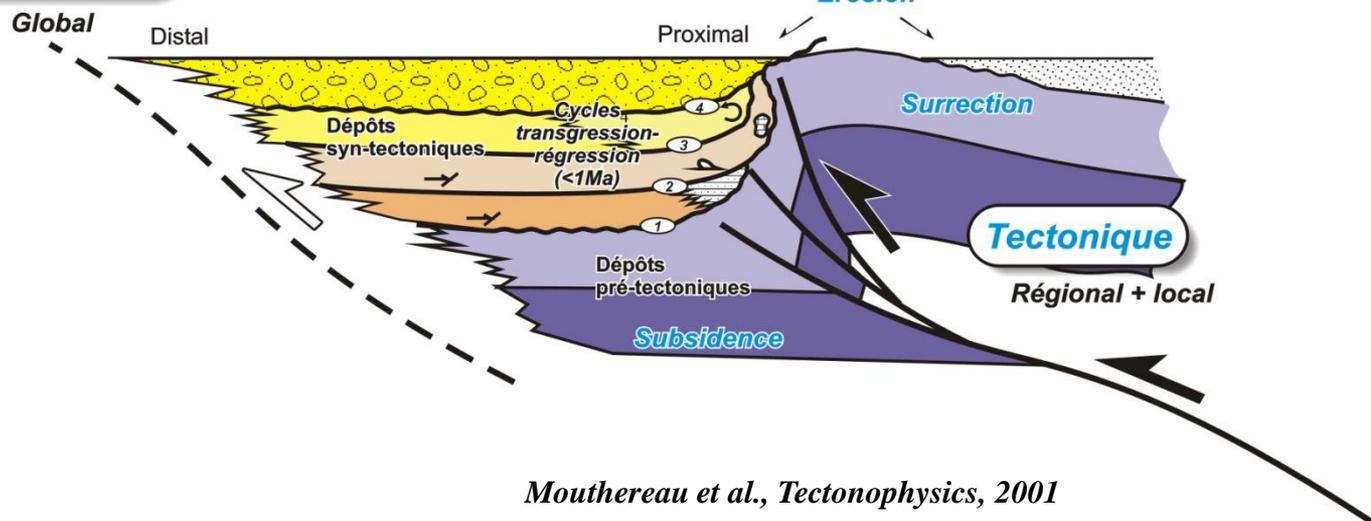


L'unité chevauchante

Eustatisme

Apport sédimentaire

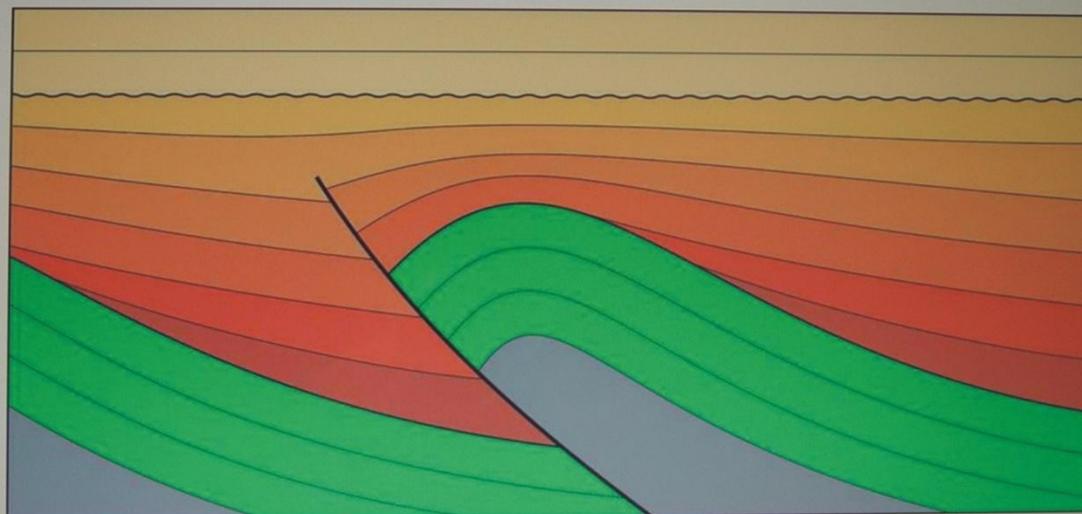
Régional + local



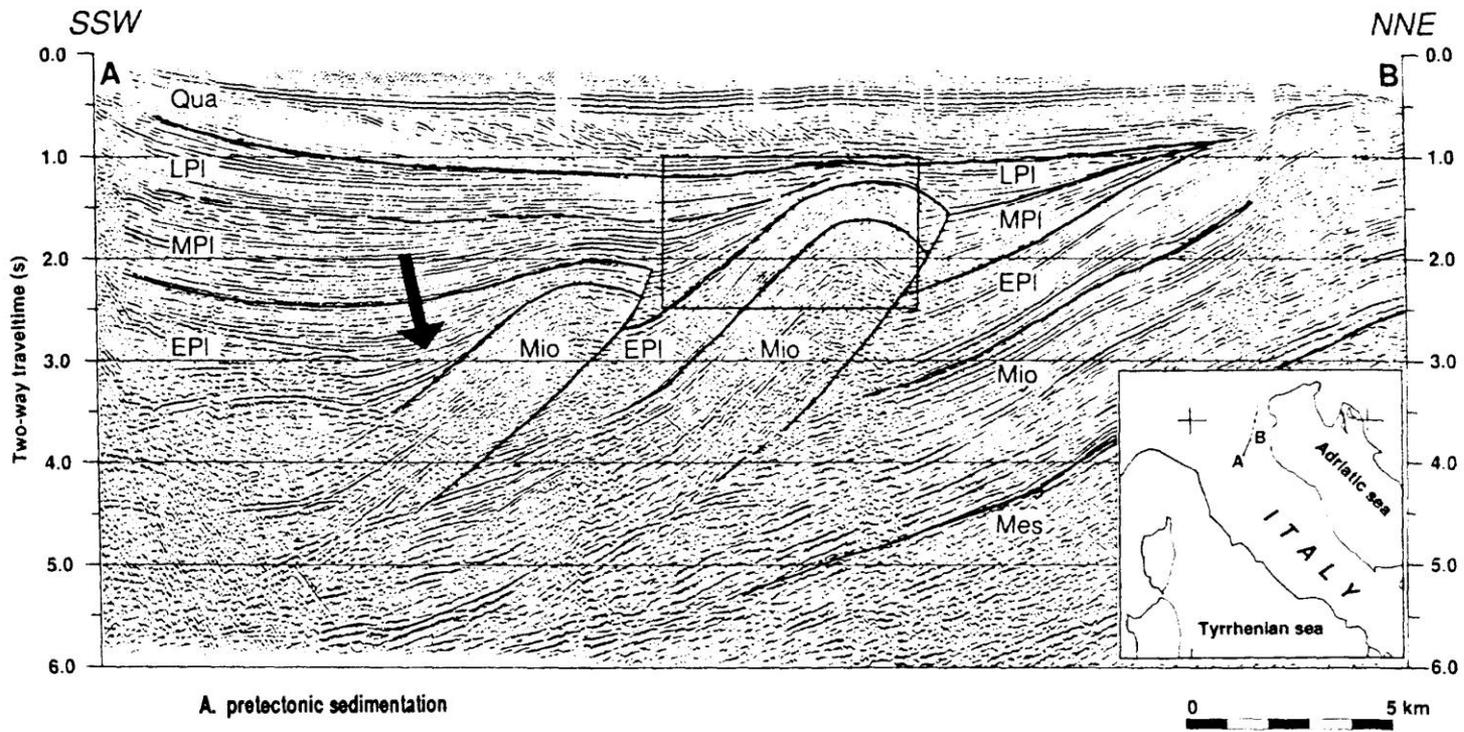
Mouthereau et al., Tectonophysics, 2001



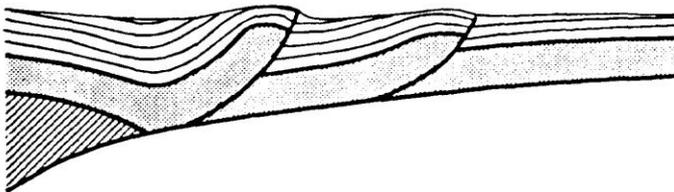
Socle
 Décollement
 Dépôts anté-compression
 Dépôts syn-compression



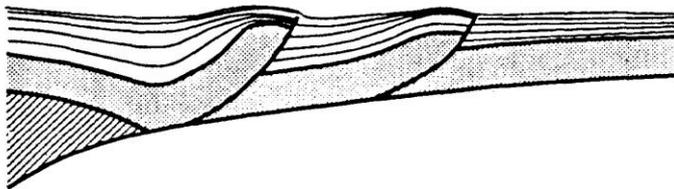
Dépôts anté-déformation
 Dépôts syn-déformation
 Dépôts post-déformation



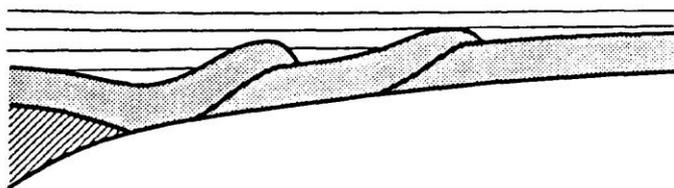
A. pre-tectonic sedimentation



B. syntectonic sedimentation



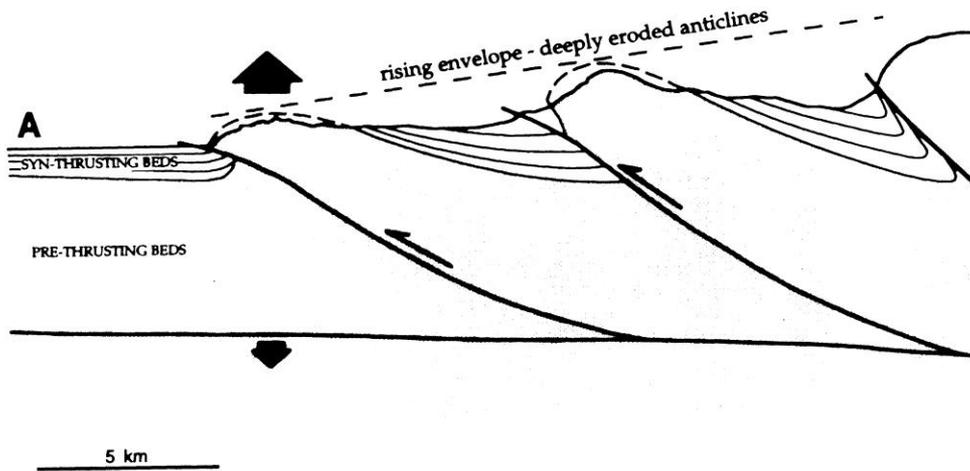
C. post-tectonic sedimentation



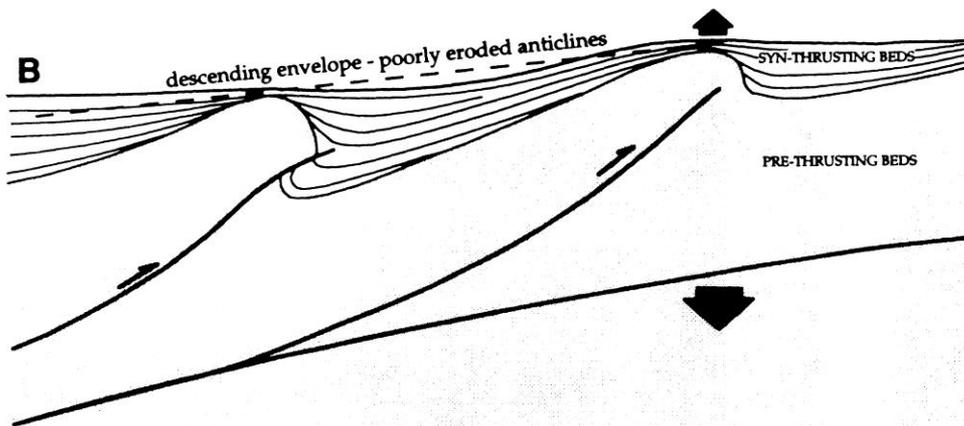
*Tectonique syn-sédimentaire
au front des Apennins*

Géométrie des séries syntectoniques en fonction de la subsidence et de la sédimentation régionale

FOLD UPLIFT > REGIONAL SUBSIDENCE

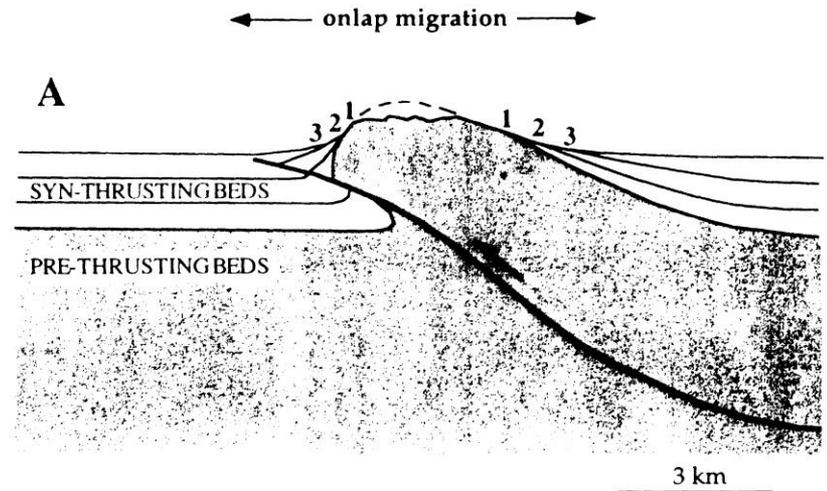


FOLD UPLIFT < REGIONAL SUBSIDENCE

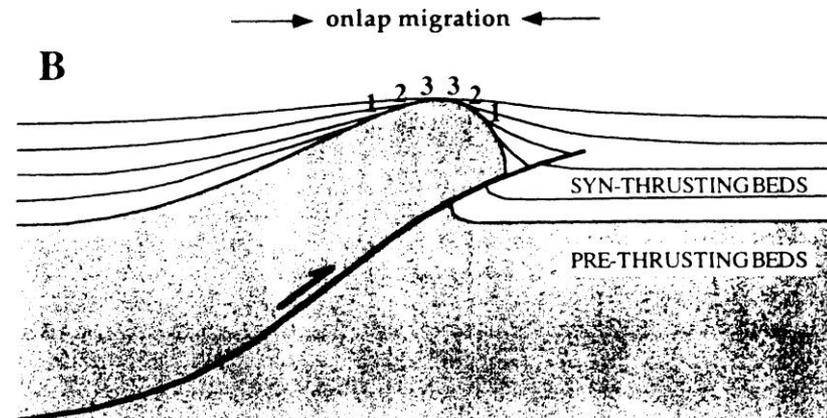


Dogliani et Prosser, 1992

Sedimentation rate < Fold total uplift

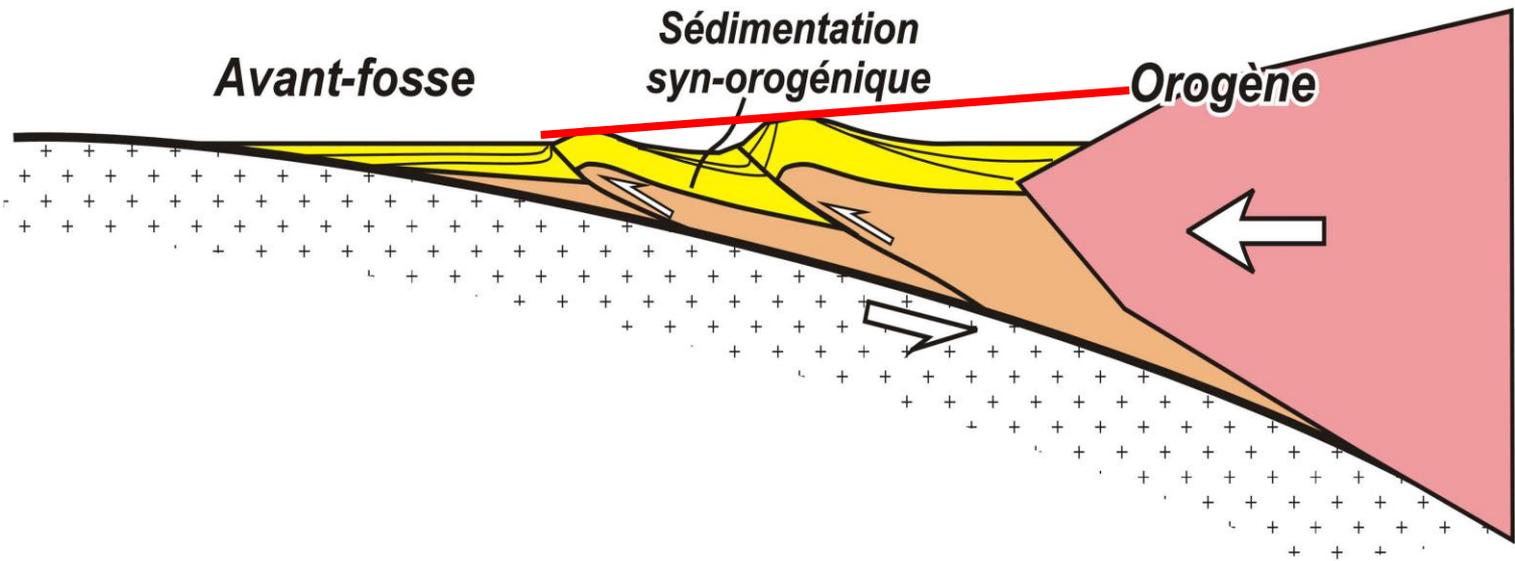


Sedimentation rate > Fold total uplift

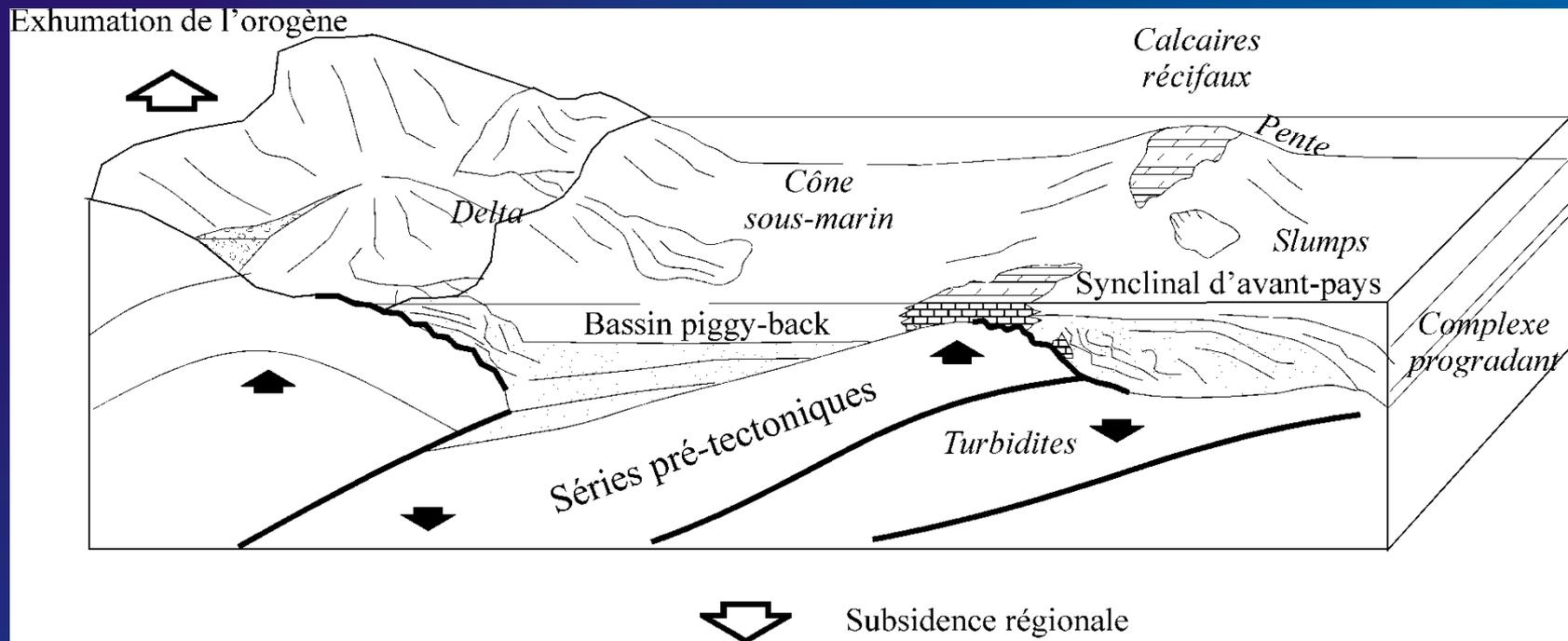


Bassin d'avant-pays

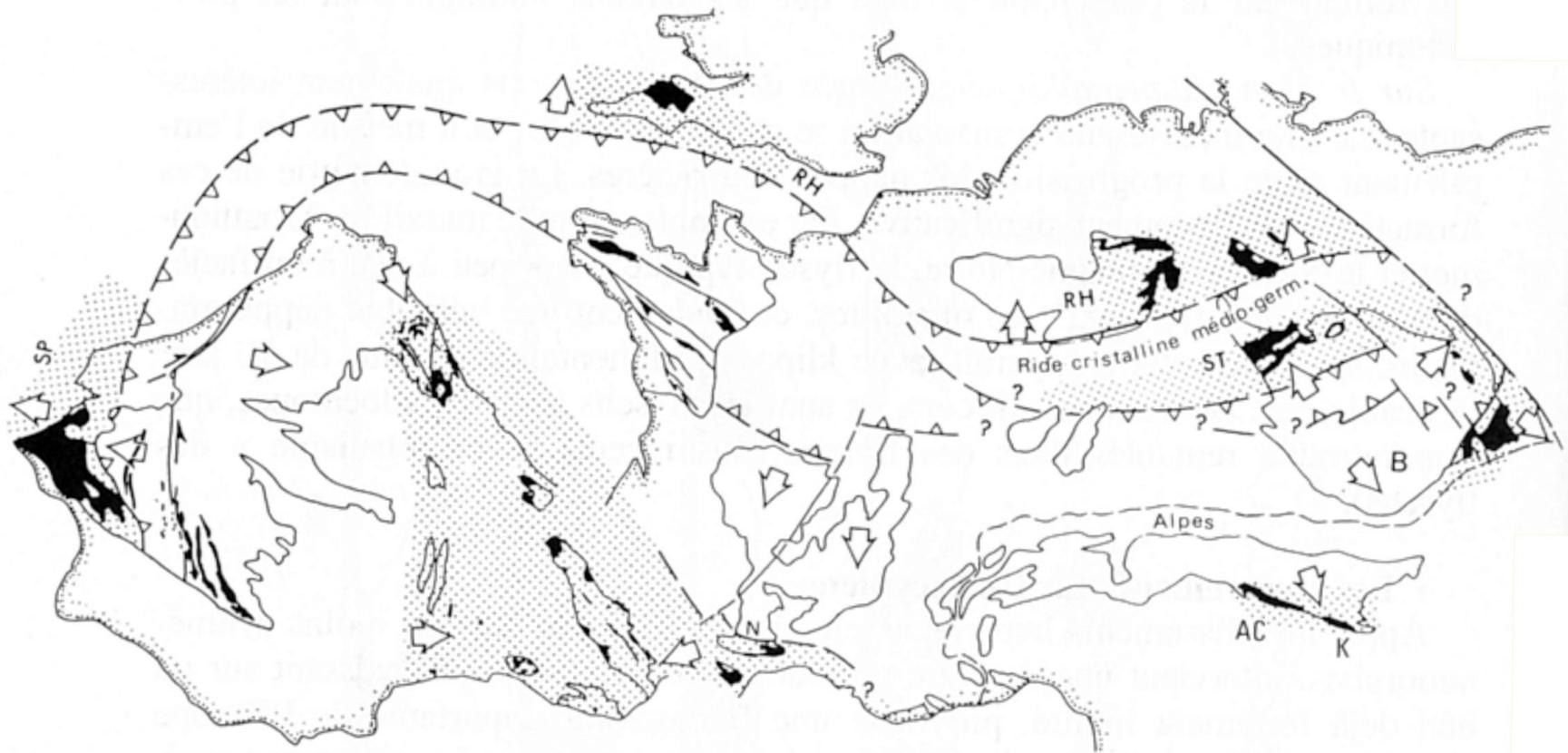
Prisme orogénique



Signature sédimentaire de l'activité tectonique à l'échelle de l'unité chevauchante



Et dans l'ancien ?
Exemple de l'hercynien

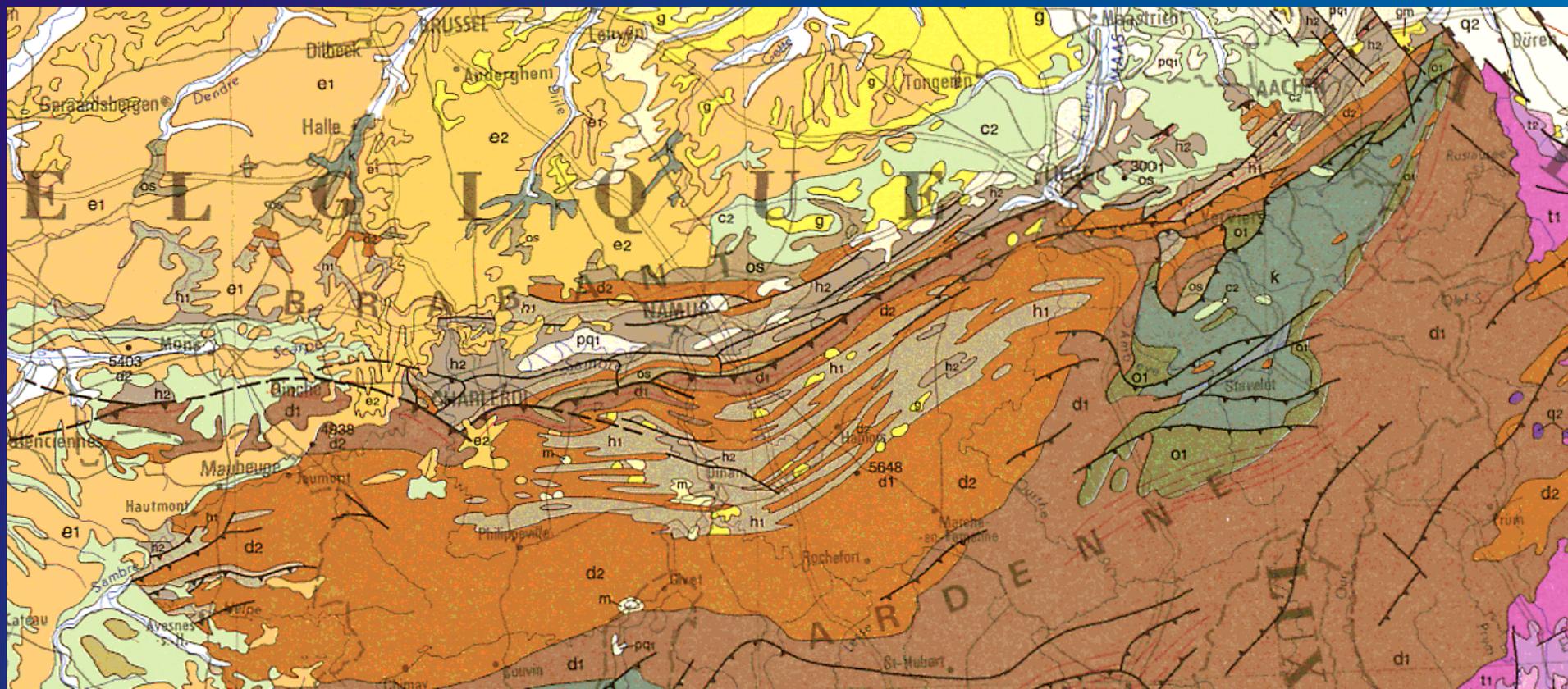
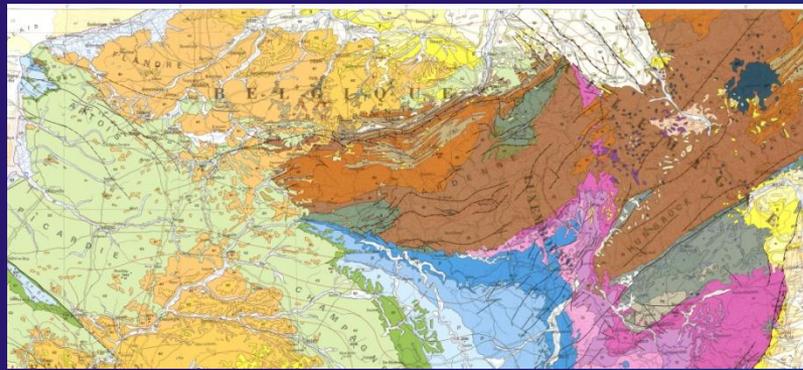


Principales zones d'affleurement des flyschs varisques en Europe occidentale (d'après Franke et Engle, 1986).
 RH. zone rhéno-hercynienne, ST. zone saxo-thuringienne, AC. Alpes carniques, B. massif de Bohême, K. Karawanken, N. Montagne noire.







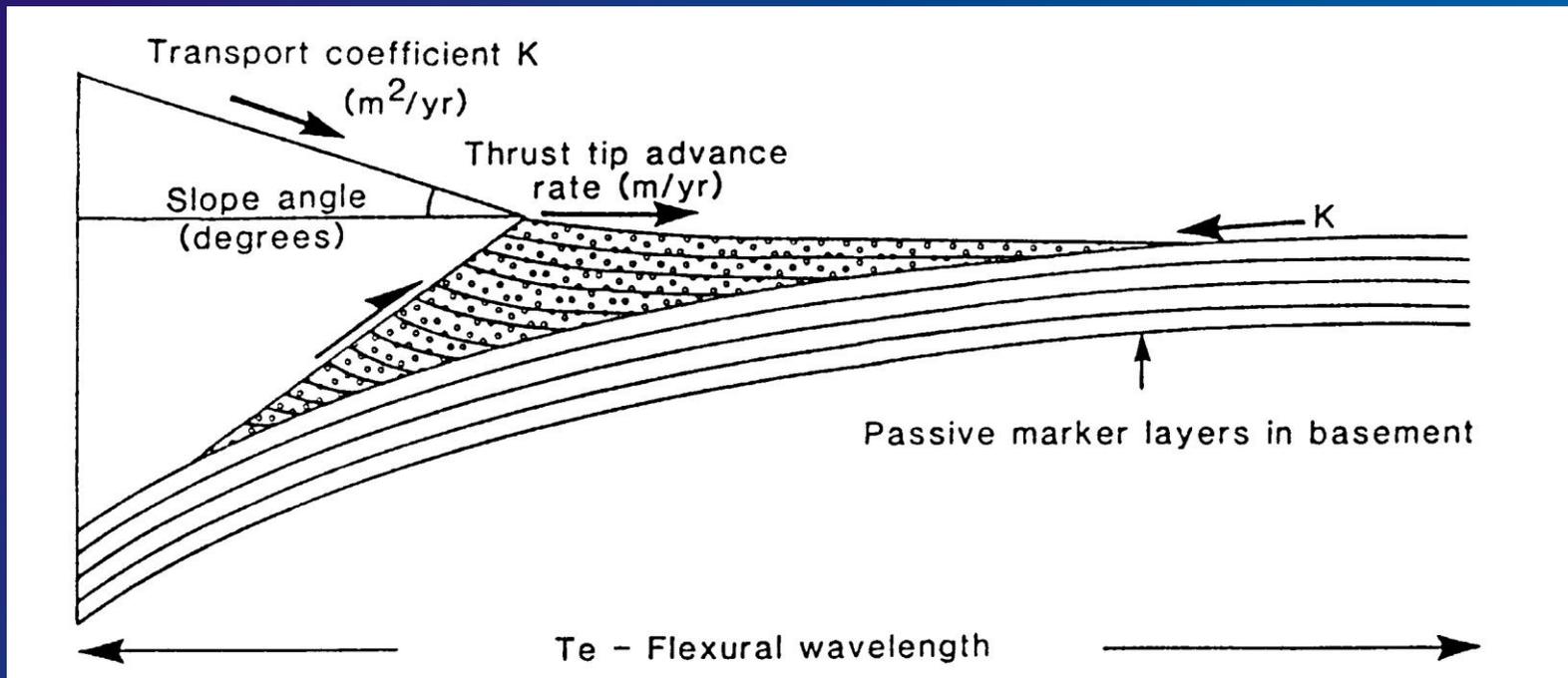


Modélisation de la dynamique des bassins d'avant-pays

Modélisation du remplissage d'un bassin d'avant-pays

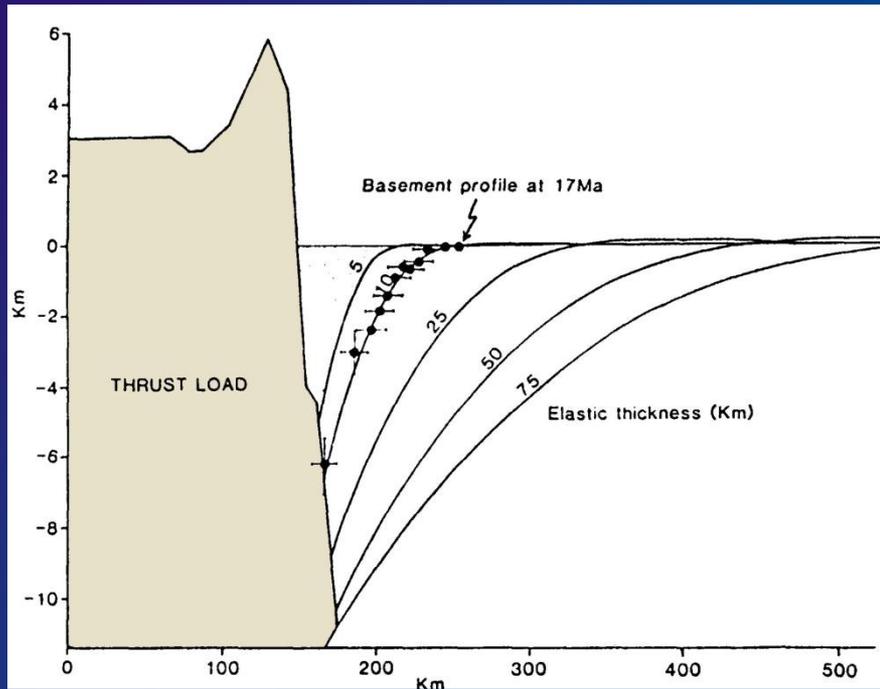
Les principaux paramètres physiques modélisés :

- Erosion d'un prisme orogénique (diffusion) dépendant de la pente et donc de la mécanique du prisme
- Taux de propagation de l'orogène
- Rigidité de la plaque (T_e)

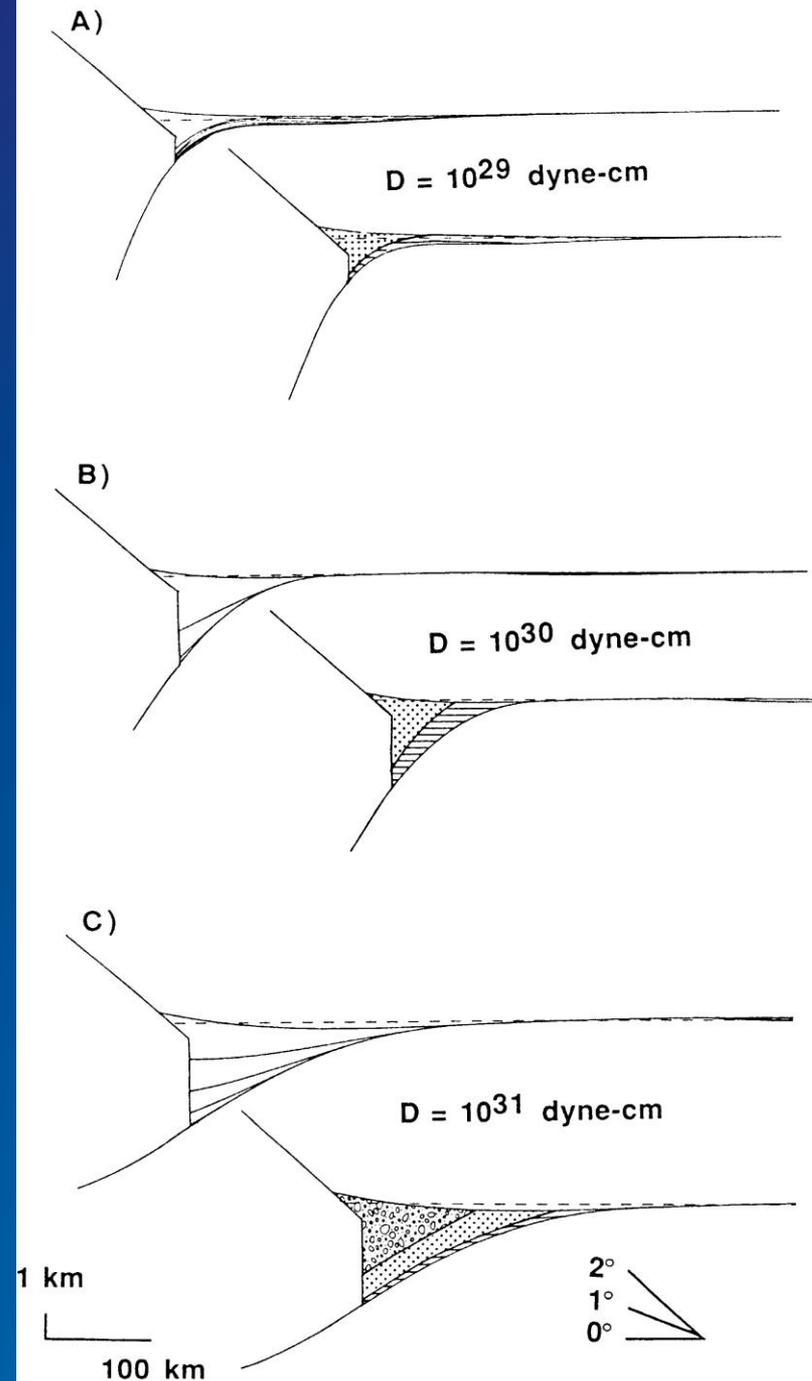


Rigidité de la plaque

Plus la lithosphère est « forte » plus le bassin est large
Au contraire si la plaque est « faible » la bassin est plus étroit et relativement plus profond



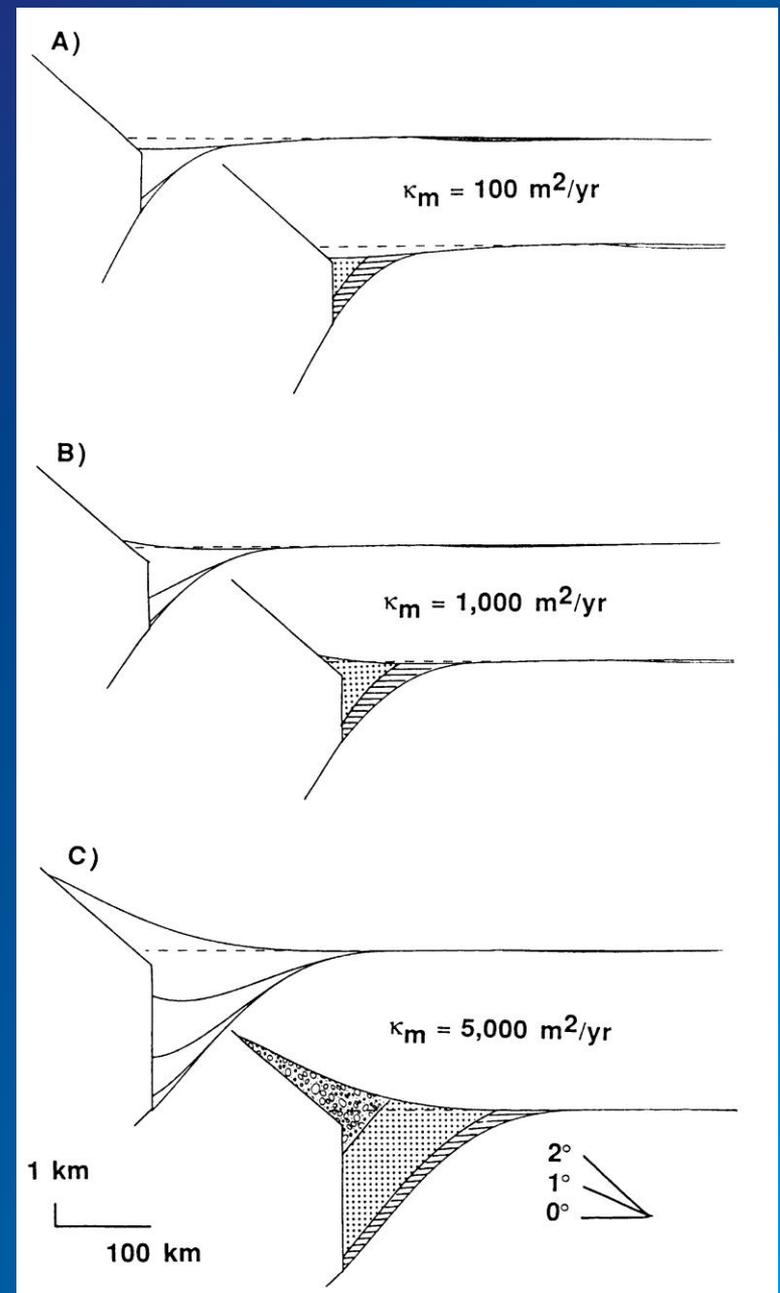
Sinclair et al., Tectonics, 1991



L'érosion

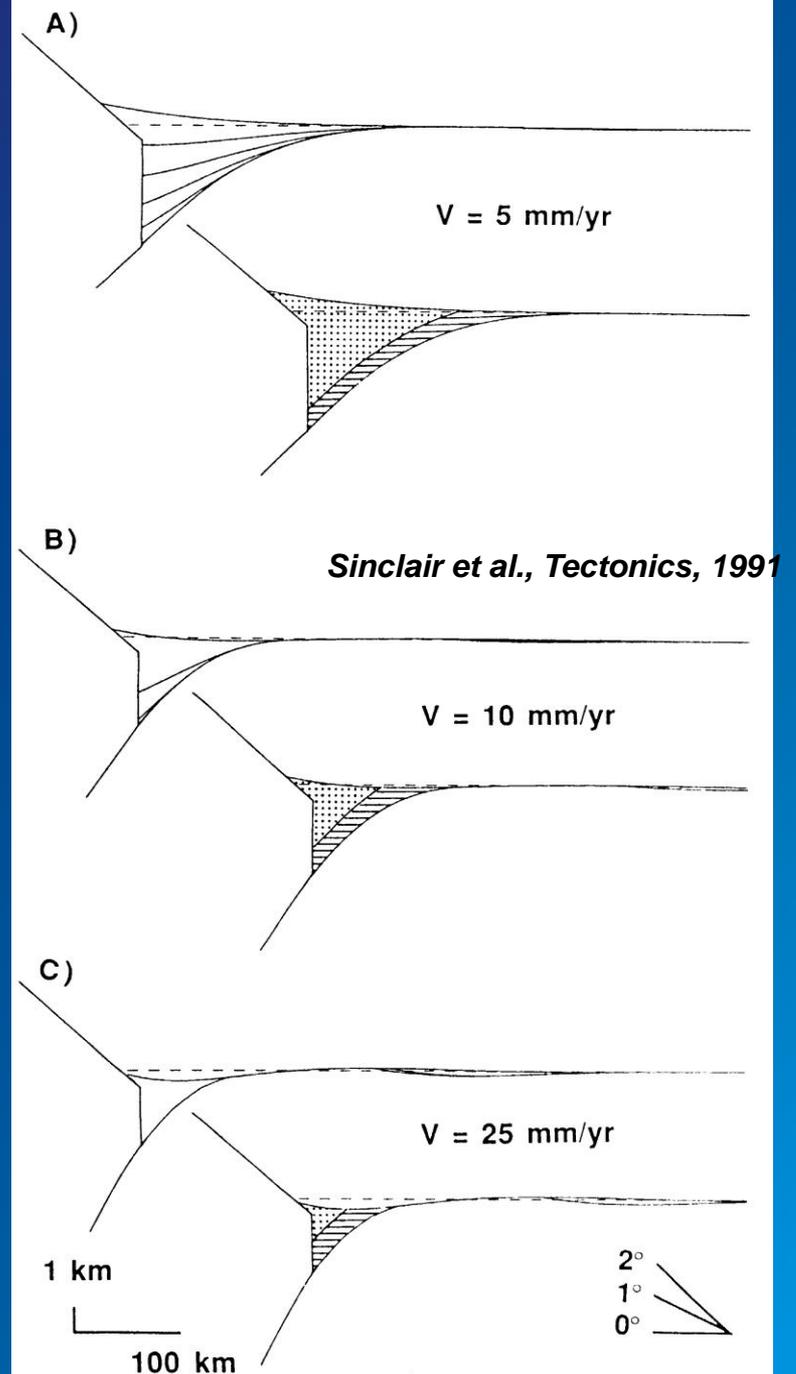
*L'apport sédimentaire
détermine le type de dépôt
dominant*

*La charge sédimentaire
conduit à l'élargissement
du bassin*



La propagation du prisme

Un taux de migration élevé limite l'accumulation de sédiments dans le bassin

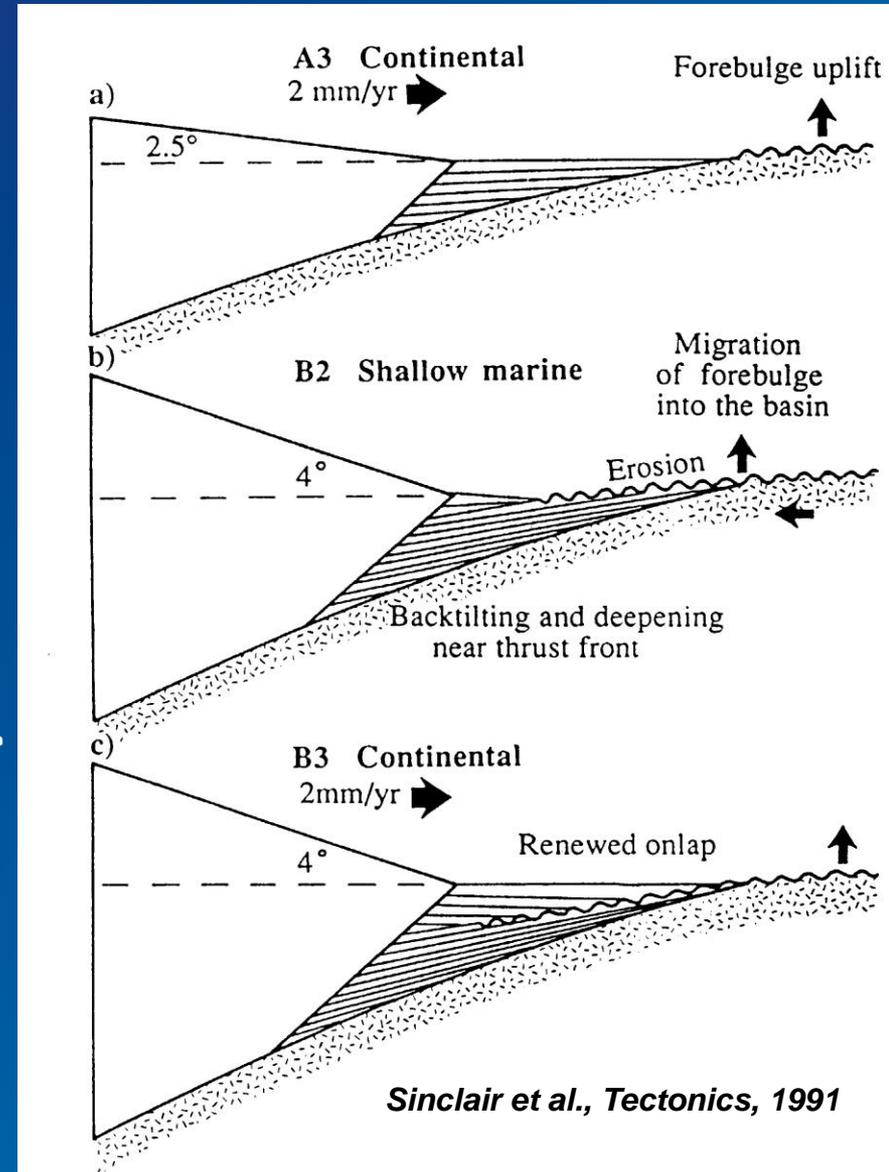


Expliquer des discordances internes par la tectonique : observations stratigraphiques et sédimentaires

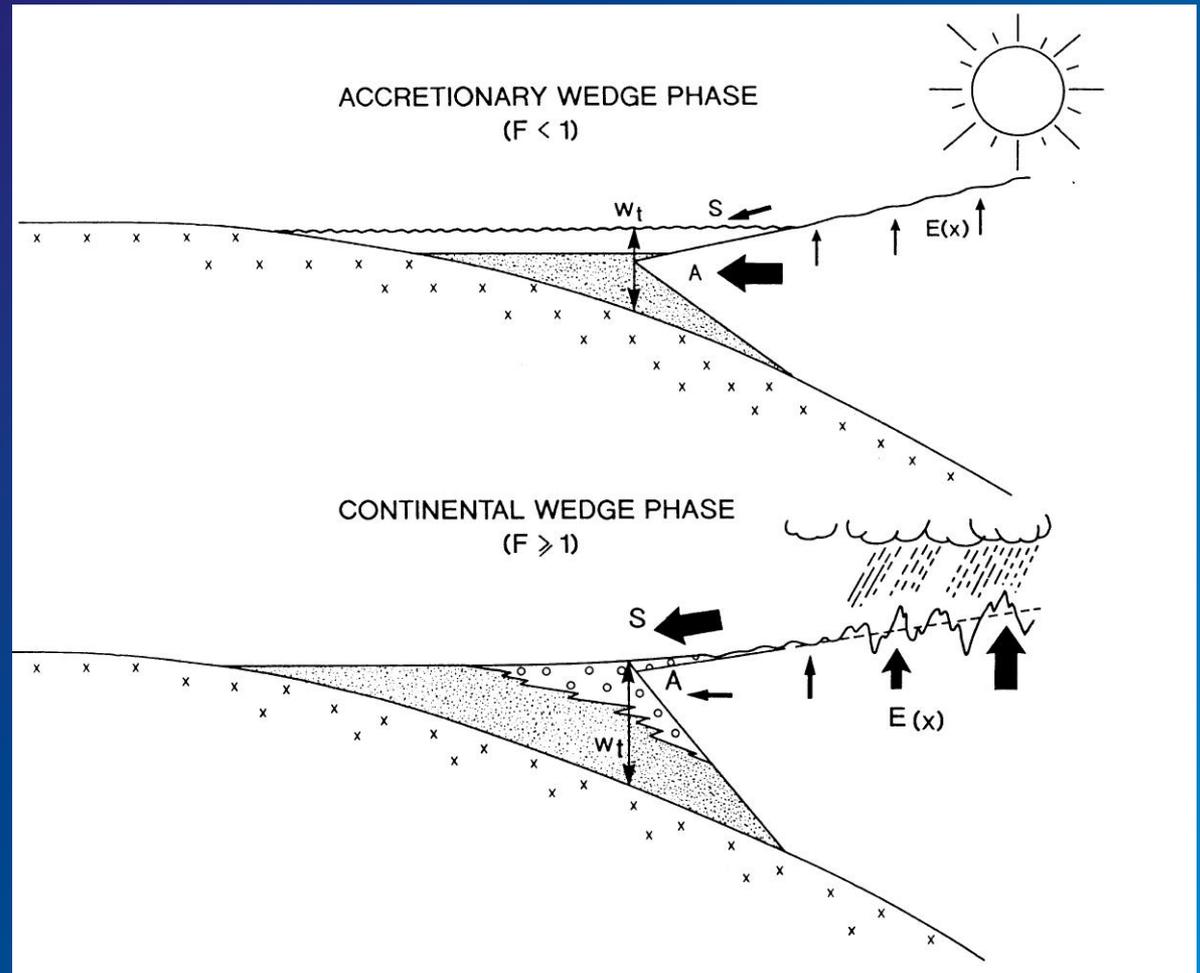
a) sédimentation continentale et formation d'une discordance « forebulge »

b) La propagation du prisme est arrêté mais il continue à s'épaissir par déformation interne, la pente topographique s'accroît donc l'érosion. Le bassin s'élargit et s'approfondit.

c) Le prisme se propage à nouveau. Une discordance s'établit entre dépôts continentaux et marins qui migre vers l'intérieur du bassin.



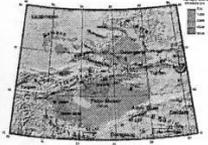
Bassin sous-alimenté
stade « océanique »



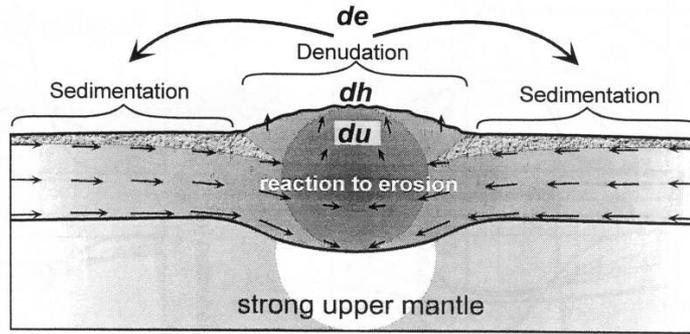
Bassin sur-alimenté
stade « continental »

(d'après Sinclair)

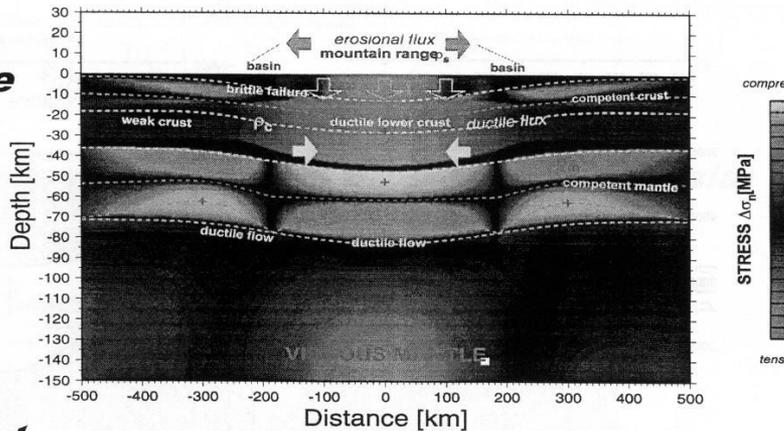
***l'érosion + compression = couplage dynamique =
= croissance des montagnes (Avouac and Burov, 1996):***



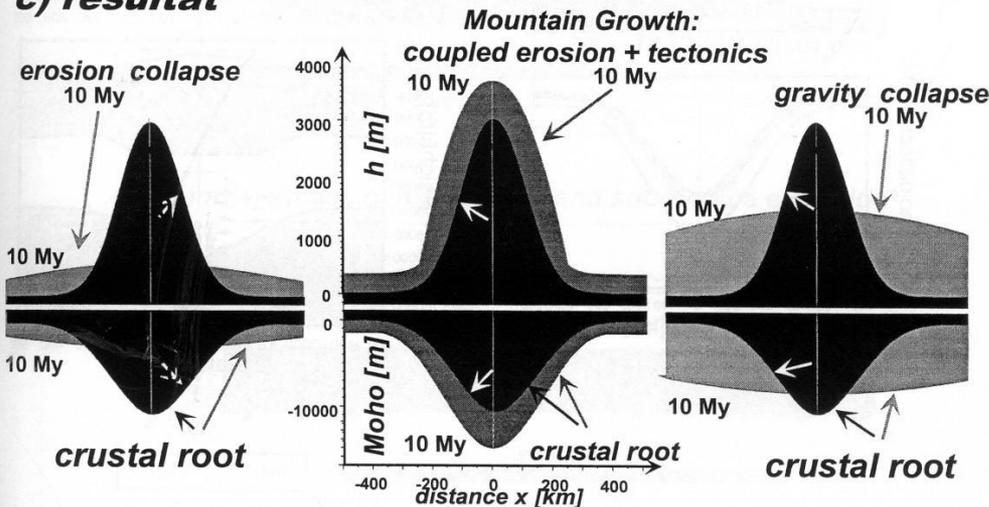
a) idée:



b) modèle

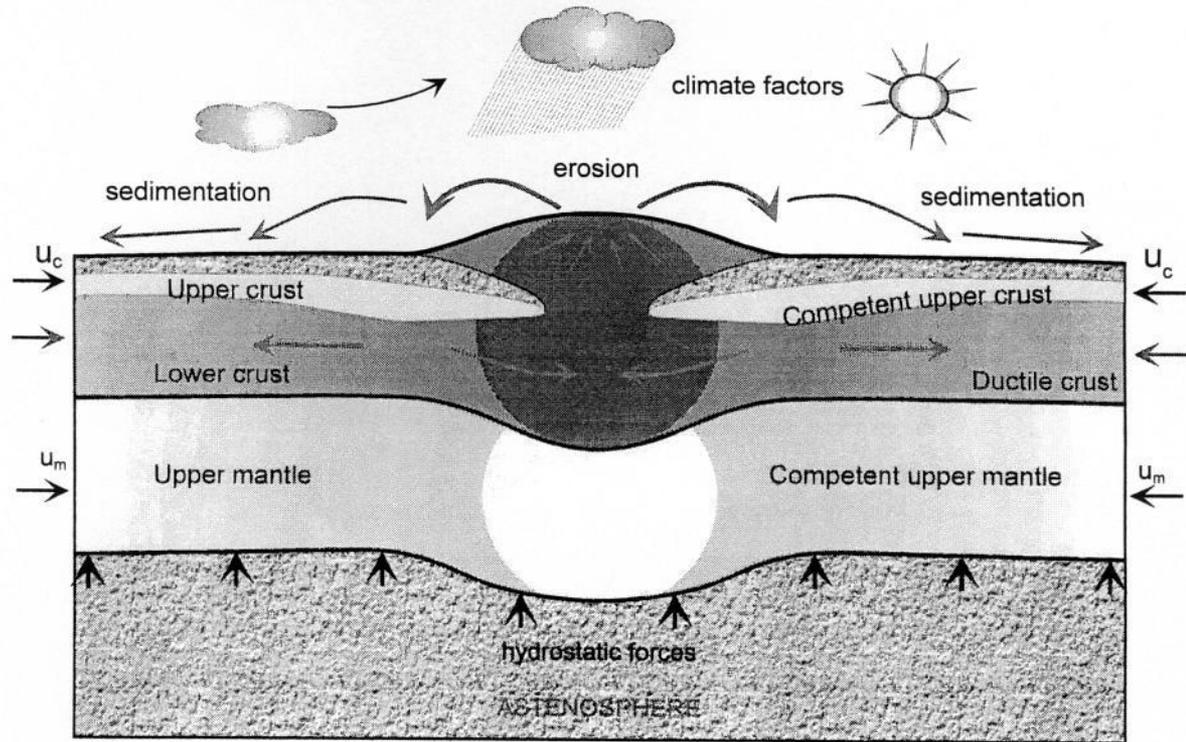


c) résultat



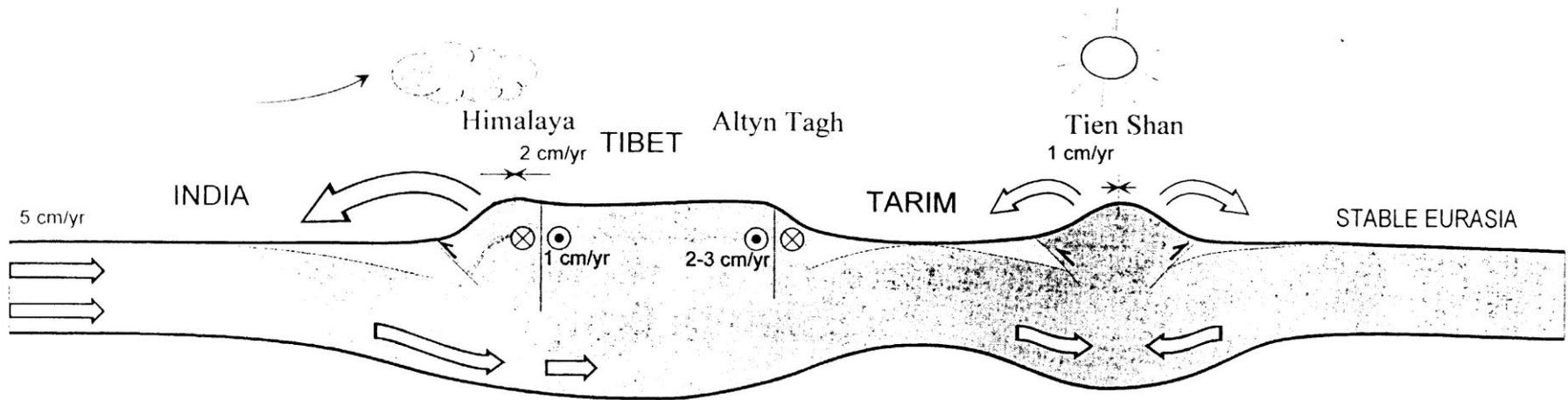
**Il ne peut y avoir
formation pérenne
de reliefs
sans érosion !**

(d'après Burov)



(d'après Burov)

Le climat en stimulant l'érosion contrôle les taux de déformation !



(d'après Burov)