

Eléments de tectonique jurassienne

Professeur Olivier LACOMBE

UPMC
PARIS UNIVERSITAS

cnrs
UMR 7193

ISTeP
PARIS UNIVERSITAS

Institut des Sciences de la Terre
de Paris

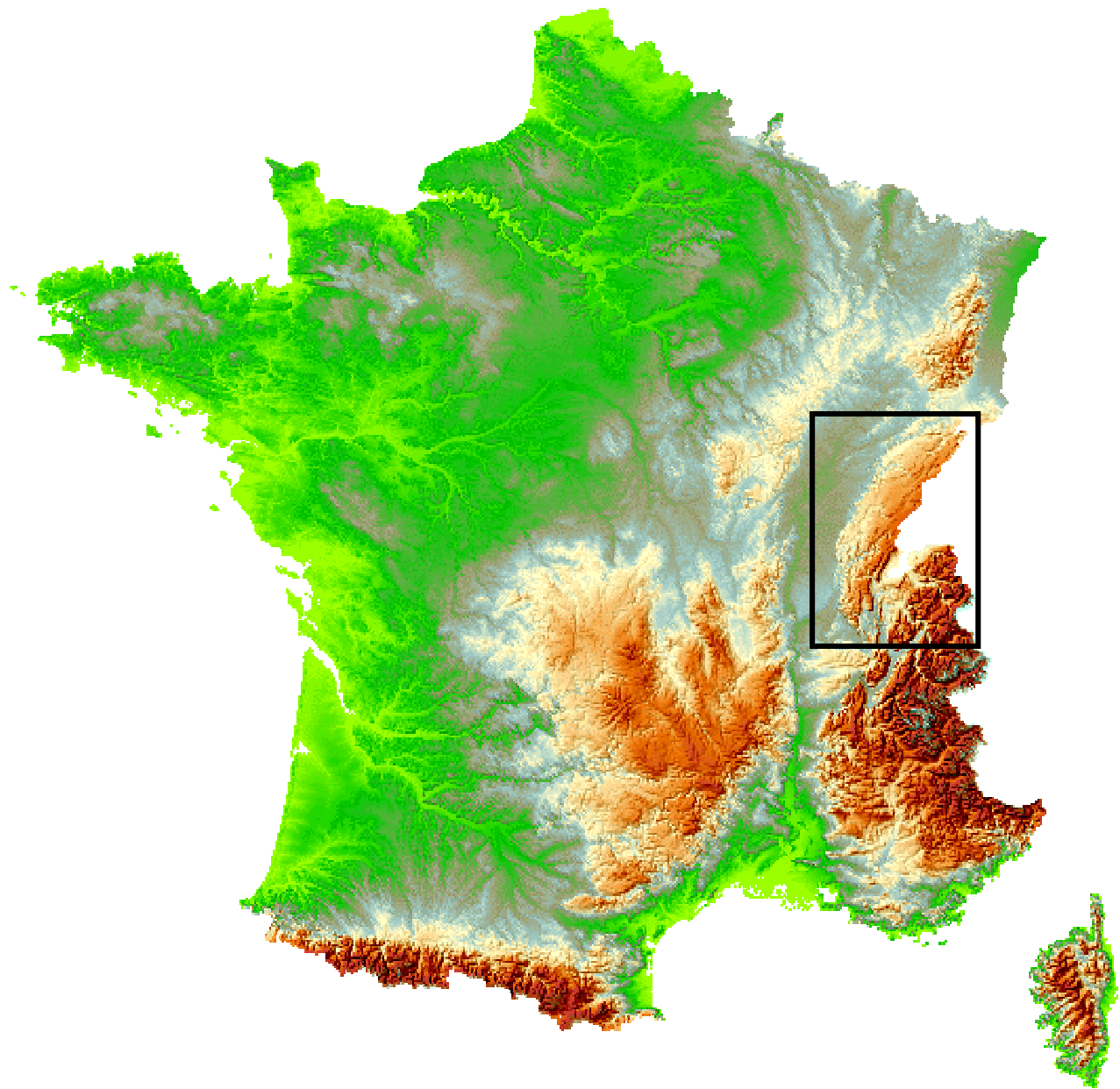
Éléments de bibliographie (non exhaustive)

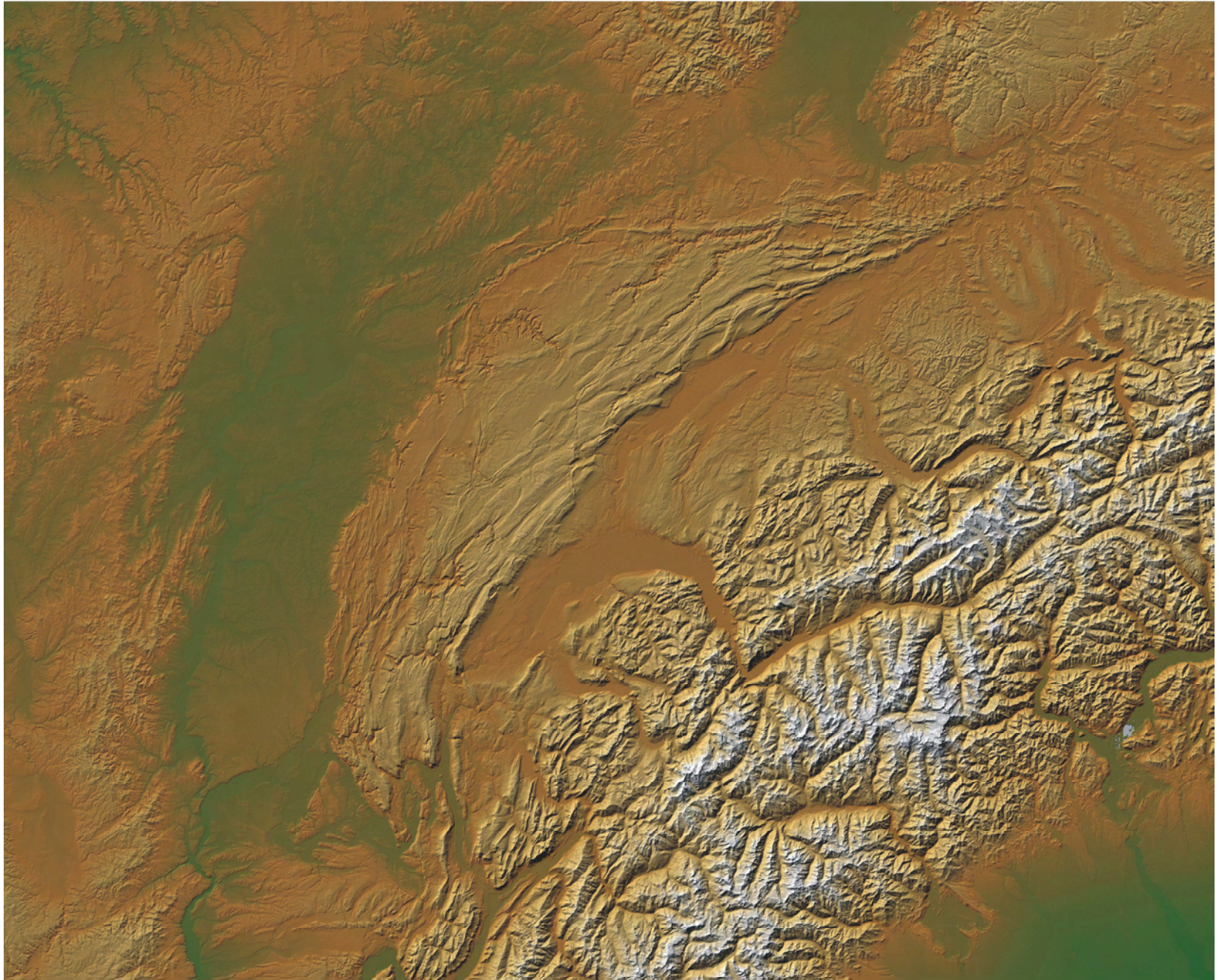
- Affolter T. and Gratier J.-P., 2004, Map view retrodeformation of an arcuate fold-and-thrust belt : the Jura case, *J. Geophys. Res.*, 109, B03404, doi:10.1029/2002JB002270
- Affolter T., Faure J.L., Gratier J.P. and Colletta B., Kinematic models of deformation at the front of the Alps : new data from map-view restoration, 2008, *Swiss J. of Geosciences*, 101, 289-303, doi:10.1007/s00015-008-1263-3
- Becker A., 1999, The Jura mountains : an active foreland fold-and-thrust belt? *Tectonophysics*, 321, 381-406
- Burkhard M. and Sommaruga A., 1998. Evolution of the Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt, *Geol. Soc. London, Spec. Publ.*, 134, 279-298
- Chauve, P., R. Enay, P. Fluck, and C. Sittler, 1980, L'Est de la France (Vosges, Fossé Rhéнан, Bresse, Jura), *Ann. Sci. Univ. Besancon*, 4, 3 – 80.
- Deichmann N., 1992, Recent seismicity of the northern Alpine foreland of Switzerland, *Eclogae geol. Helv.*, 85/3, 701-705
- Deichmann N. and Baer M., 1990, Earthquake focal depths below the Alps and northern Alpine foreland of Switzerland. In : *The European Geotraverse : Integrative studies* (ed. by R. Freeman, P. Giese and St. Mueller). European Science Foundation, Strasbourg, France, 277-288
- Diebold P. and Noack T., 1997, Late Paleozoic troughs and Tertiary structures in the eastern folded Jura, in O.A. Pfiffner, P. Lehner, P. Heitzman, S. Mueller, A. Steck (eds), *Deep structure of the Swiss Alps - Results from NRP 20*, Birkhäuser, Basel, 59-63
- Gorin G.E., Signer C. and Amberger G., 1993, Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data., *Eclogae Geol. Helv.*, 86, 3, 693-716
- Guellec S., Mugnier J.L., Tardy M. and Roure F., 1990, Neogene evolution of the western Alpine foreland in the light of ECORS data and balanced cross-section, *Mem. Soc. geol. France*, 156, 165-184
- Gubler E., Arca S., Kakkuri J. And Zippelt K., 1992, Recent crustal movements, in R. Freeman, S. Mueller (eds), *Atlas of compiled data – a Continent Revealed – the European Geotraverse*, University press, Cambridge, 20-25
- Hindle D. and Burkhard M., 1999. Strain, displacement and rotation associated with the formation of curvature in fold belt : the example of the Jura arc, *J. Struct. Geol.*, 21, 1089-1101
- Hindle D., Besson O. and Burkhard M., 2000. A model of displacement and strain for arc-shaped mountain belts applied to the Jura arc, *J. Struct. Geol.*, 22, 1285-1296
- Homberg C., Angelier J., Bergerat F. and Lacombe O., 1994. Nouvelles données tectoniques dans le Jura externe: apport des paléocontraintes. *C. R. Acad. Sc.*, t.318, II, 1371-1377
- Homberg C., Hu J.-C., Angelier J., Bergerat F. and Lacombe O., 1997. Characterization of stress perturbations near major fault zones : insights from field studies (Jura Mountains) and numerical modelling. *J. Struct. Geol.*, 19, 5, 703-718
- Homberg C., Lacombe O., Angelier J. and Bergerat F., 1999. New constraints for indentation mechanisms from the Jura Mountains (France). *Geology*, 27, 9, 827-830
- Homberg C., Bergerat F., Philippe Y., Lacombe O. and Angelier J., 2002, Structural inheritance and Cenozoic stress fields in the Jura fold-and-thrust belt. *Tectonophysics*, 357, 137-158

- Homberg C., Angelier J., Bergerat F. and Lacombe O., 2004, Using stress deflections to identify slip events in fault systems. *Earth and Planetary Science Letters*, 217, 3-4, 409-424
- Jouanne F., Ménard G. and Darmendrail X., 1995, Present-day vertical displacements in the north-western Alps and southern Jura Mountains : data from leveling comparisons, *Tectonics*, 14, 3, 606-616
- Lacombe O. and Angelier J., 1993. Evolution tectonique du Jura externe au Cénozoïque et perturbations de contraintes dans la Zone Transformante Rhin-Saône. *C. R. Acad. Sc.*, t.317, II, 1113-1120
- Lacombe O. et Mouthereau F., 2002. Basement-involved shortening and deep detachment tectonics in forelands of orogens : insights from recent collision belts (Taiwan, western Alps, Pyrenees). *Tectonics*, 21, 4, 10.1029/2001TC901018
- Laubscher H.P. 1986, The eastern Jura : relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional, *Geol. Rundschau*, 75, 535-553
- Madritsch H., Schmid S. and Fabbri O., 2008, Interactions between thin- and thick-skinned tectonics at the northwestern front of the Jura fold-and-thrust belt (eastern France), *Tectonics*, 27, TC5005, doi:10.1029/2008TC002282,
- Martin, J., and E. Mercier, 1996, Héritage distensif et structuration chevauchante dans une chaîne de couverture: Apport de l'équilibrage par modélisation géométrique dans le Jura nord-occidental, *Bull.Soc. Geol. Fr.*, 167, 101 – 110.
- Meyer B., Lacassin R., Brulhet J. and Mouroux B., 1994, The Basel 1356 earthquake: which fault produced it?, *Terra Nova*, 6, 54-63
- Mosar J., 1999, Present-day and future underplating in the western Swiss Alps : reconciliation of basement/wrench-faulting and thrust detachment folding of the Jura and Molasse basin in the Alpine foreland, *Earth. Plan. Sc Lett.*, 173, 143-155
- Pavoni N., 1977, Erdbeben im Gebiet des Schweiz, *Eclogae Geol. Helv.*, 70, 2, 351-370
- Pavoni N., Maurer H.R., Roth P. and Deichmann N., 1997, Seismicity and seismotectonics of the Swiss Alps, in O.A. Pfiffner, P. Lehner, P. Heitzmann; S. Mueller, A. Steck (eds), *Deep structure of the Swiss Alps - Results from NRP 20*, Birkhäuser, Basel, 241-250
- Philippe Y., 1995. Rampes latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées : géométrie, conditions de formation et pièges structuraux associés. Thèse Université de Savoie, Chambéry.
- Philippe Y., Colletta B., Deville E. and Mascle A., 1996, The Jura fold-and-thrust belt : a kinematic model based on map balancing . In P.A. Ziegler and F. Horvath (eds), *Structure and prospects of Alpine basins and forelands, Peri-Téthys Memoir 2*, Mus. Nat. Hist. Nat ed., Paris, 170, 235-261
- Pfiffner O.A., 1993, The structure of the Helvetic nappes and its relation to the mechanical stratigraphy, *J. Struct. Geol.*, 15, 511-521
- Pfiffner O.A., Erard P.F. and Stäubli M., 1997b, Two cross sections through the Swiss Molasse Basin, in O.A. Pfiffner, P. Lehner, P. Heitzman; S. Mueller, A. Steck (eds), *Deep structure of the Swiss Alps - Results from NRP 20*, Birkhäuser, Basel, 64-71
- Rotstein Y. and Schaming M., 2004, Seismic reflection evidence for thick-skinned tectonics in the northern Jura, *Terra Nova*, Vol 16, No. 5, 250–256
- Sambeth U. and Pavoni N., 1988, A seismotectonic investigation in the Geneva Basin, southern Jura Mountains, *Eclogae geol. Helv.*, 81, 2, 433-440
- Signer C. and Gorin G.E., 1995, New geological observations between the Jura and the Alps in the Geneva area as derived from reflection seismic data, *Eclogae Geol. Helv.*, 88, 2, 235-265

- Sommaruga A., 1997, Geology of the central Jura and the Molasse basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Mém. Soc. Sci. Nat. Neuchatel*, 12, 145p
- Sommaruga A., 1999, Décollement tectonics in the Jura foreland fold-thrust belt. *Marine and Petroleum geology*, 16, 111-134
- Thouvenot F., Frechet J., Tapponnier P., Thomas J.C., Le Brun B., Ménard G., Lacassin R., Janetton L., Grasso J.R., Coutant O., Paul A., and Hatzfeld D., 1998, The M15.3 Epagny (french Alps) earthquake of 1996 July 15 : a long-awaited event on the Vuache Fault, *Geophys. J. Int.*, 135, 876-892
- Truffert C., Burg J.P., Cazes M., Bayer R., Damotte B. and Rey D., 1990, Structures crustales sous le Jura et la Bresse : contraintes sismiques et gravimétriques le long des profils ECORS Bresse-Jura et Alpes II, *Mem. Soc. geol. France*, 156, 157-164
- Tschanz X., 1990. Analyse de la déformation du Jura central entre Neuchâtel (Suisse) et Besançon, *Eclogae Geol. Helv.*, 83, 543-558
- Ustaszewski, K., and S. M. Schmid, 2006, Control of preexisting faults on geometry and kinematics in the northernmost part of the Jura fold-and-thrust belt, *Tectonics*, 25, TC5003, doi:10.1029/ 2005TC001915.
- Ustaszewski, K., and S. M. Schmid, 2007, Latest Pliocene to recent thick-skinned tectonics at the Upper Rhine Graben – Jura Mountains junction, *Swiss J. Geosci.*, 100, 293 – 312, doi:10.1007/s00015-007- 1226-0.

**Le Jura : une chaîne de montagnes
dans l'avant-pays alpin**

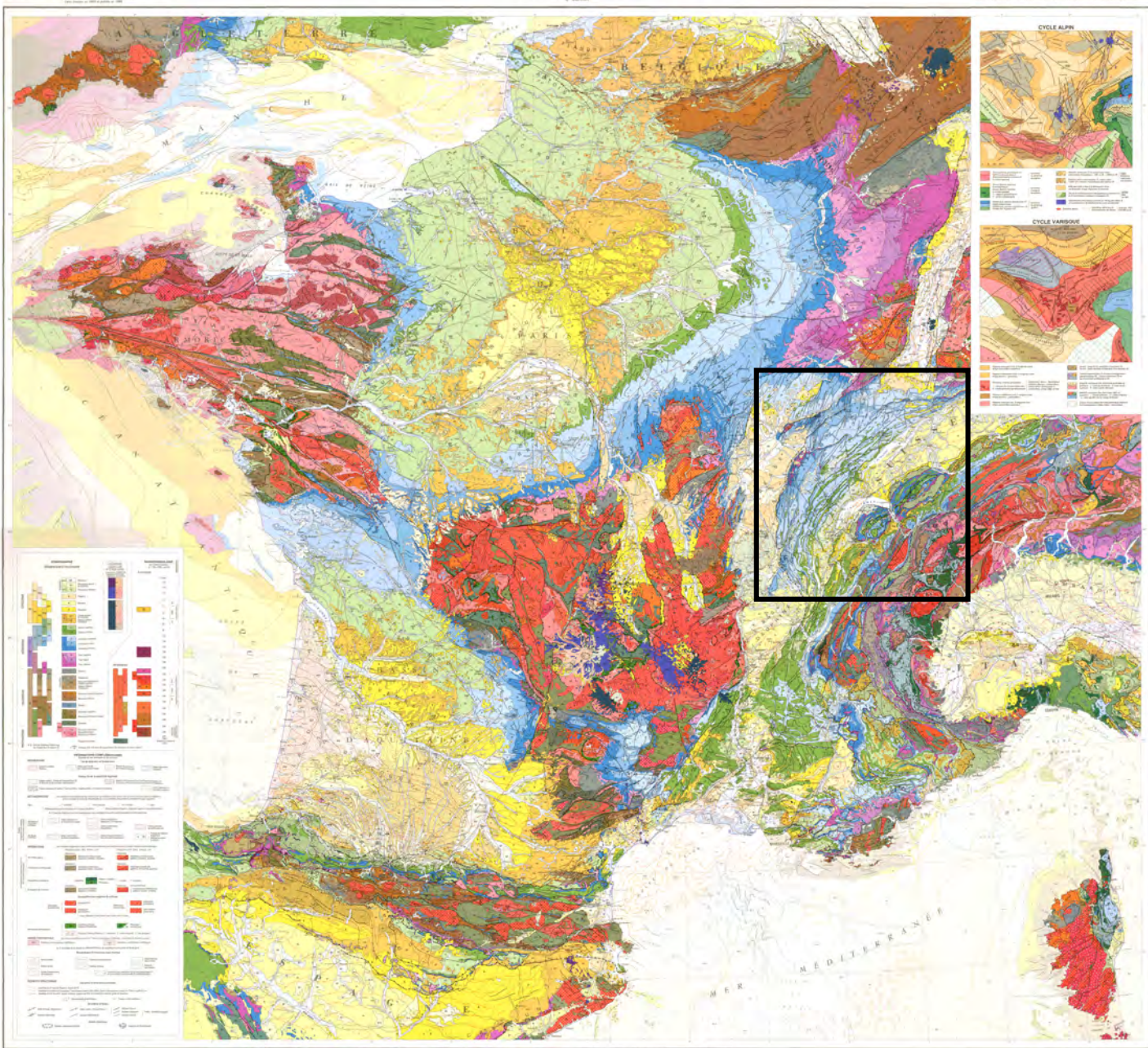




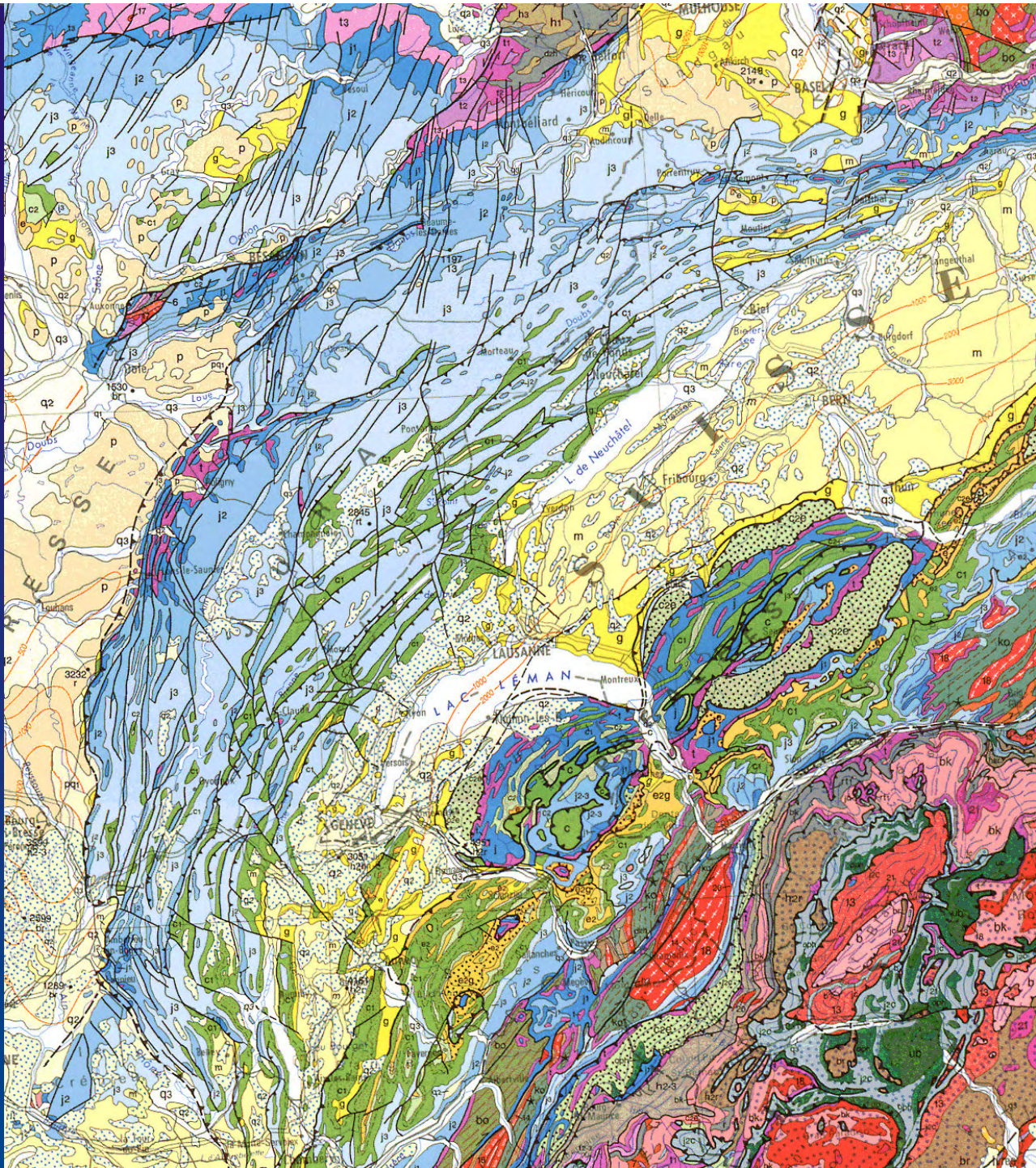
CARTE GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

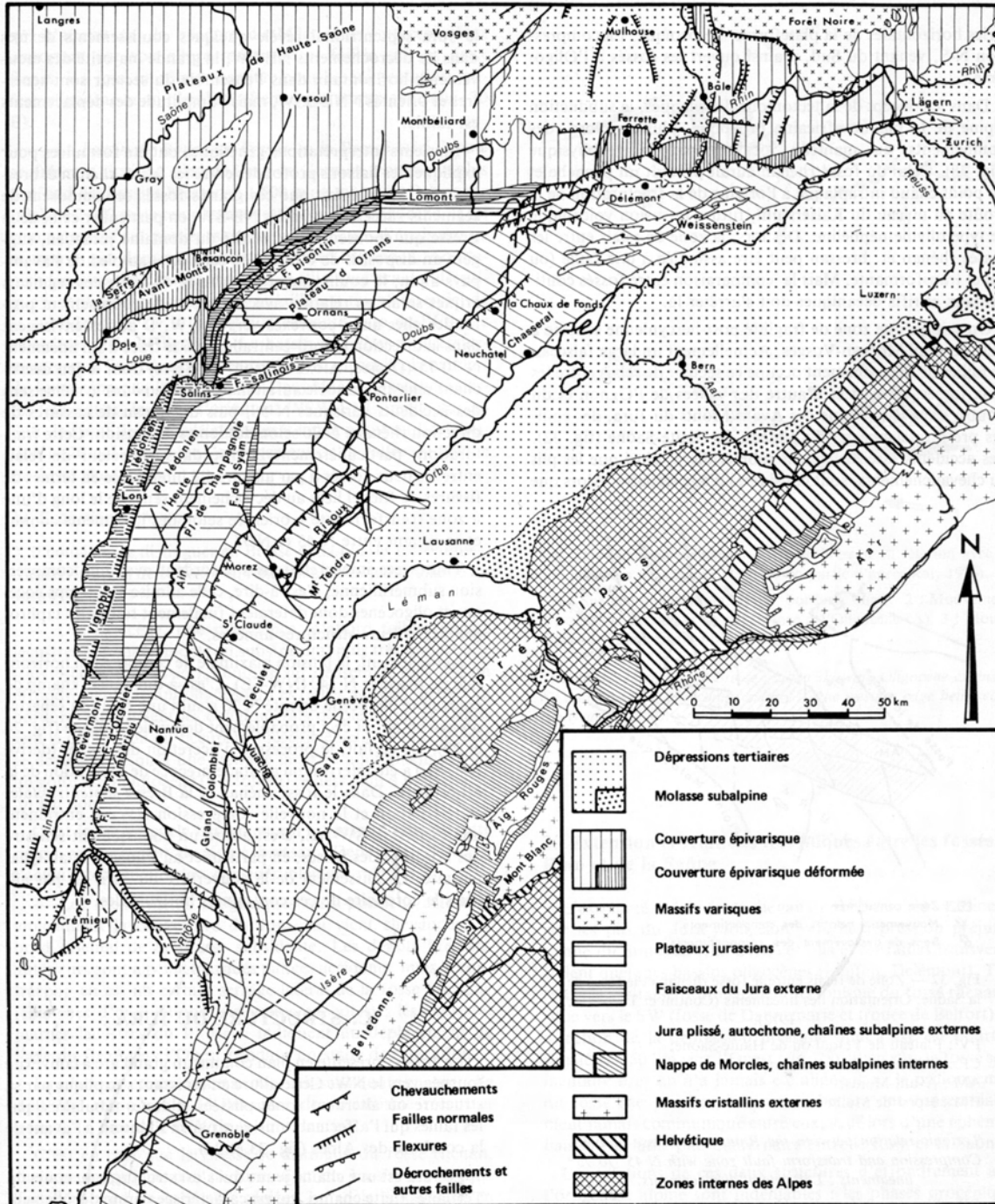
à l'échelle du millionième
8^e édition

NOTES GÉNÉRALES
Les données géologiques de cette carte sont issues de la carte géologique de France à l'échelle du millionième, 8^e édition, publiée par le BRGM en 1988. Elles ont été actualisées en fonction des nouvelles données géologiques disponibles à la date de publication de cette carte.



NOTES GÉNÉRALES
Les données géologiques de cette carte sont issues de la carte géologique de France à l'échelle du millionième, 8^e édition, publiée par le BRGM en 1988. Elles ont été actualisées en fonction des nouvelles données géologiques disponibles à la date de publication de cette carte.

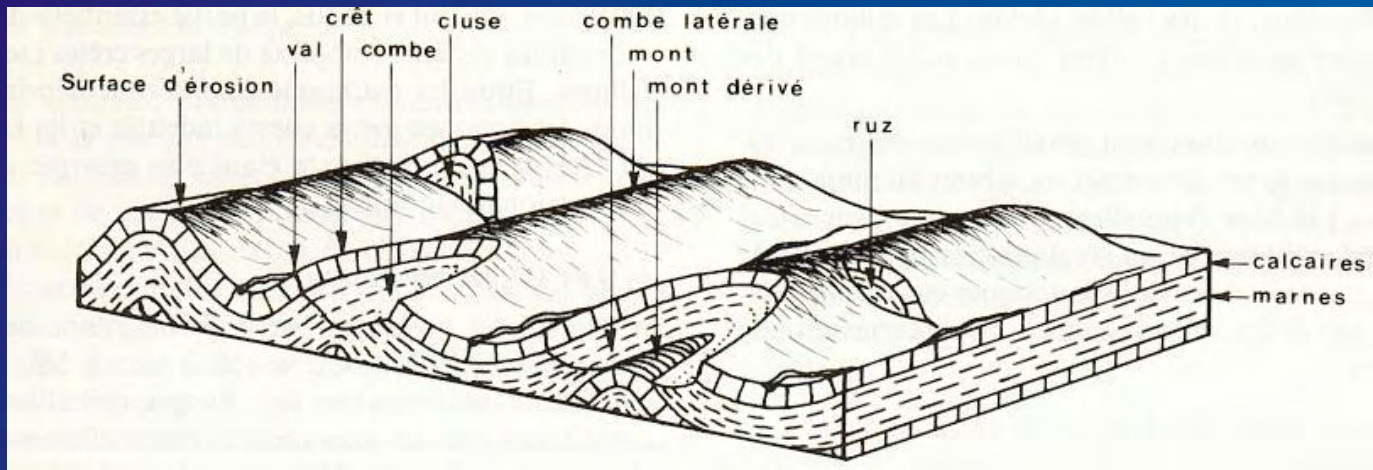




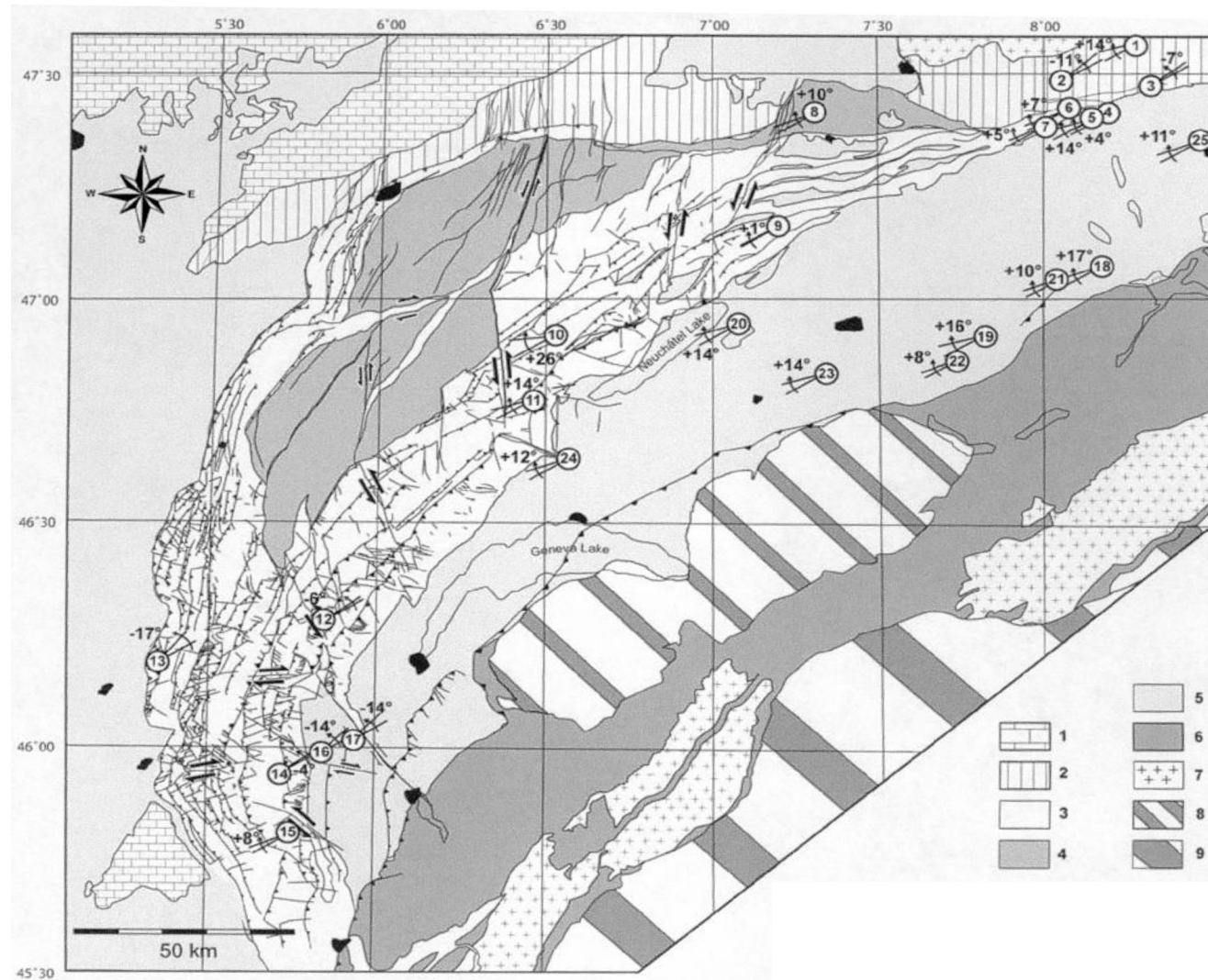






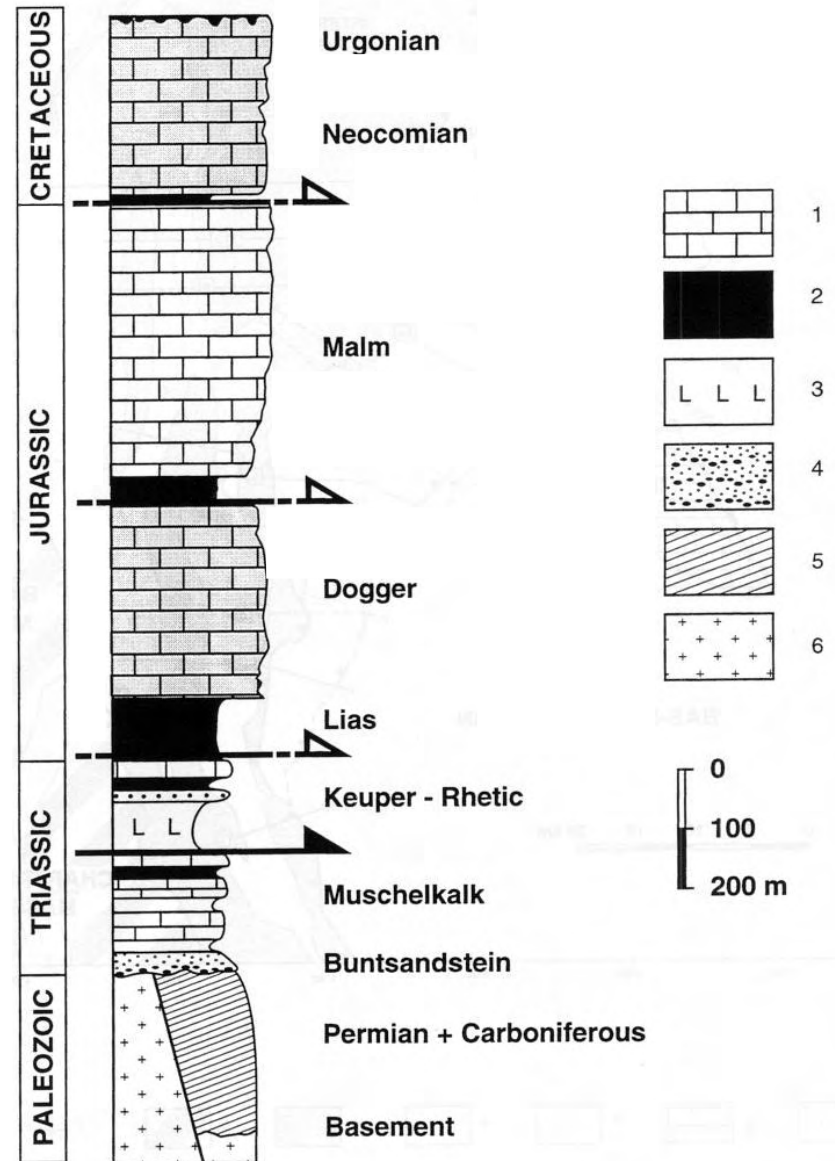


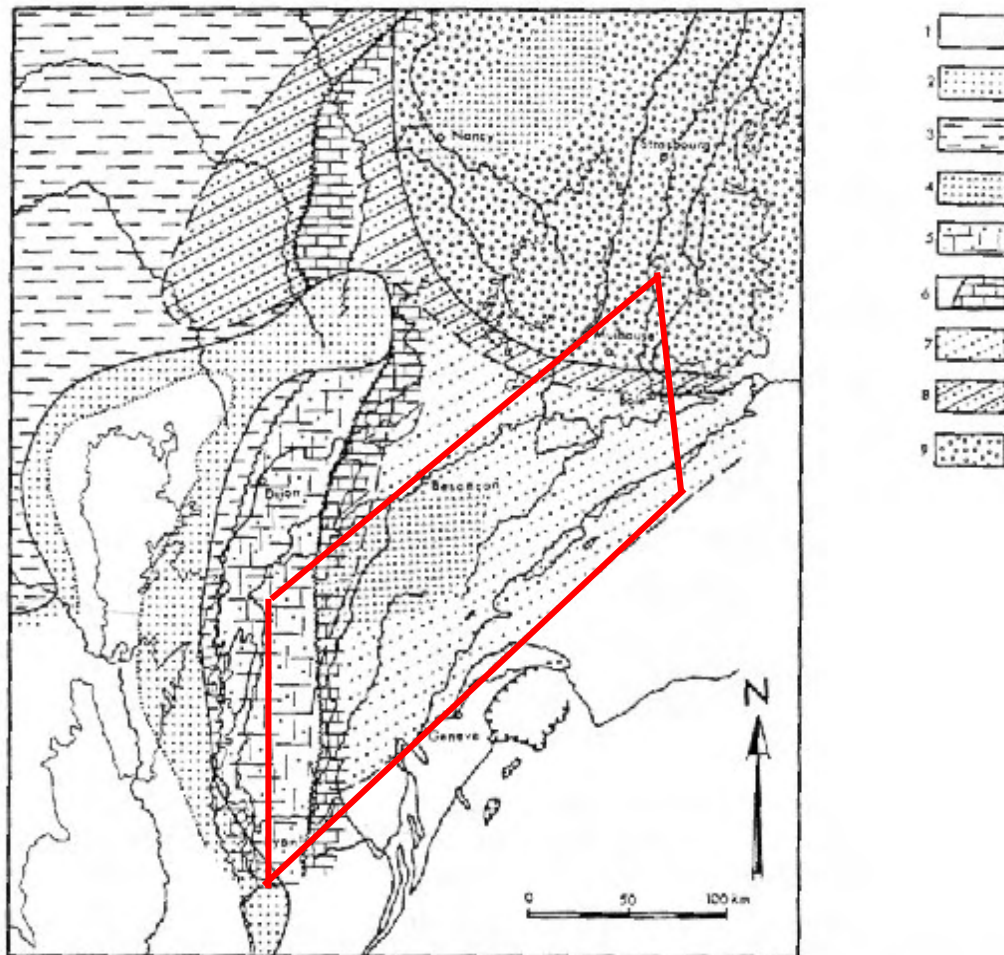
(Affolter and Gratier, 2004)



Couverture sédimentaire et socle jurassiens

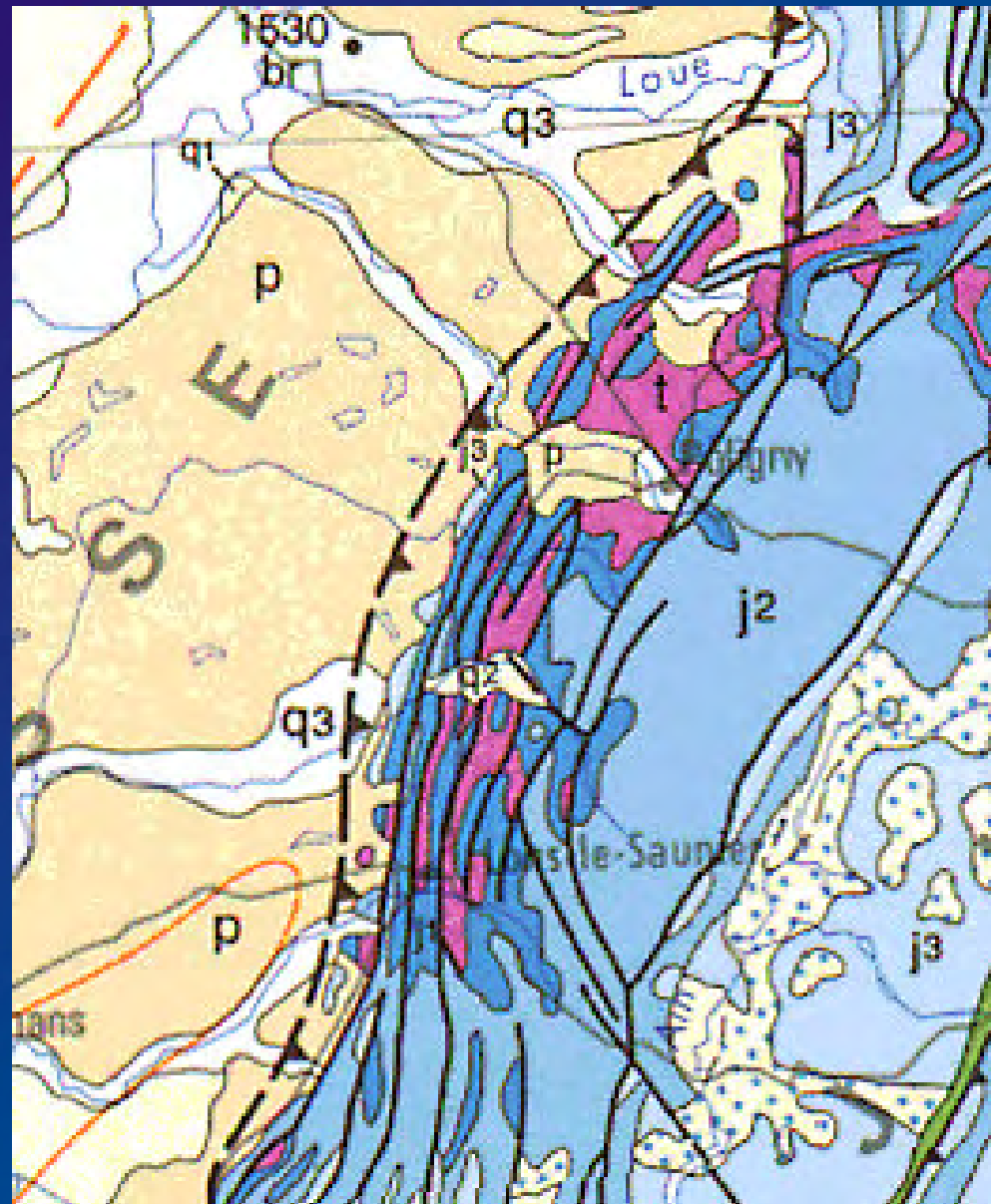
La couverture sédimentaire



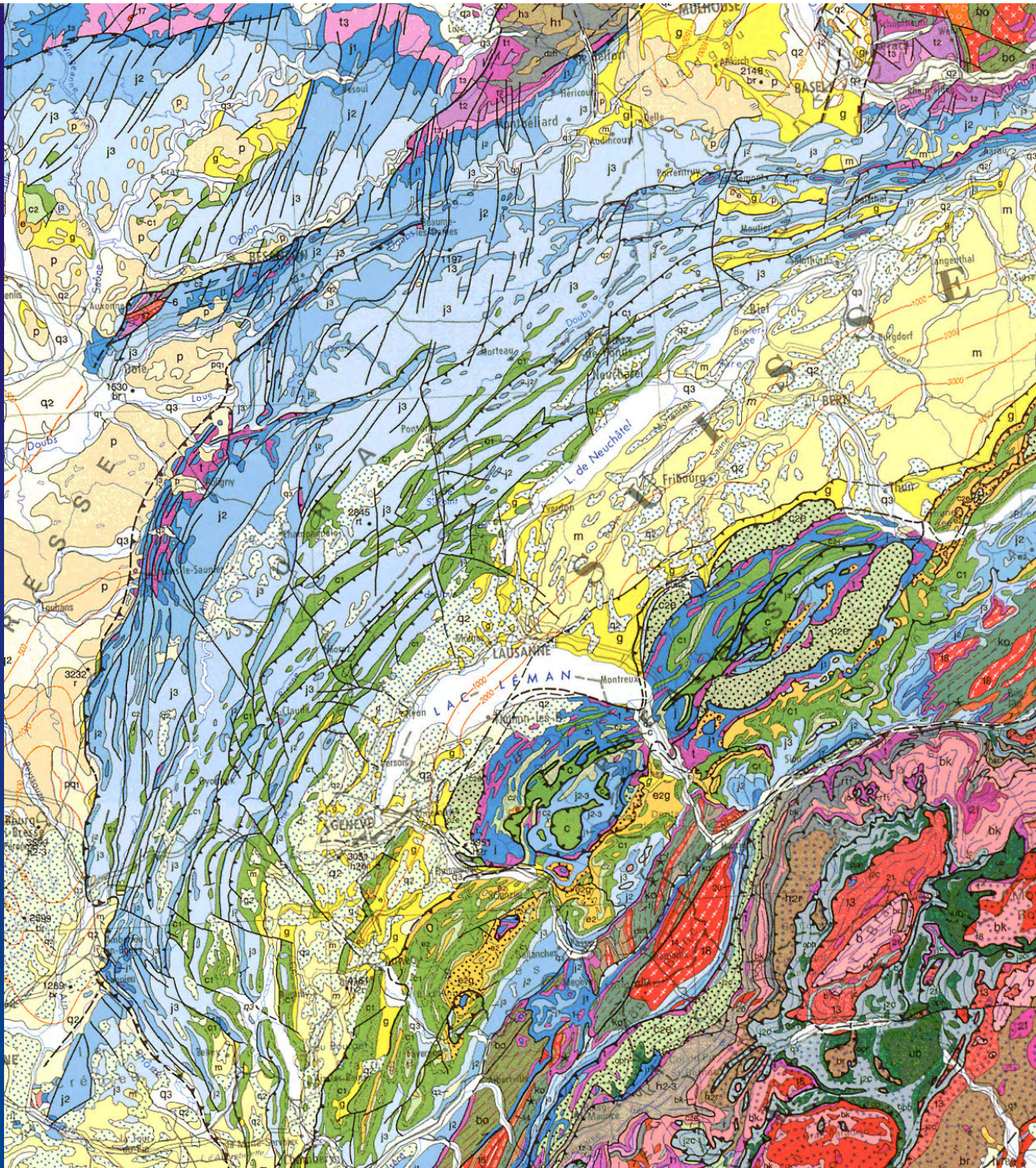


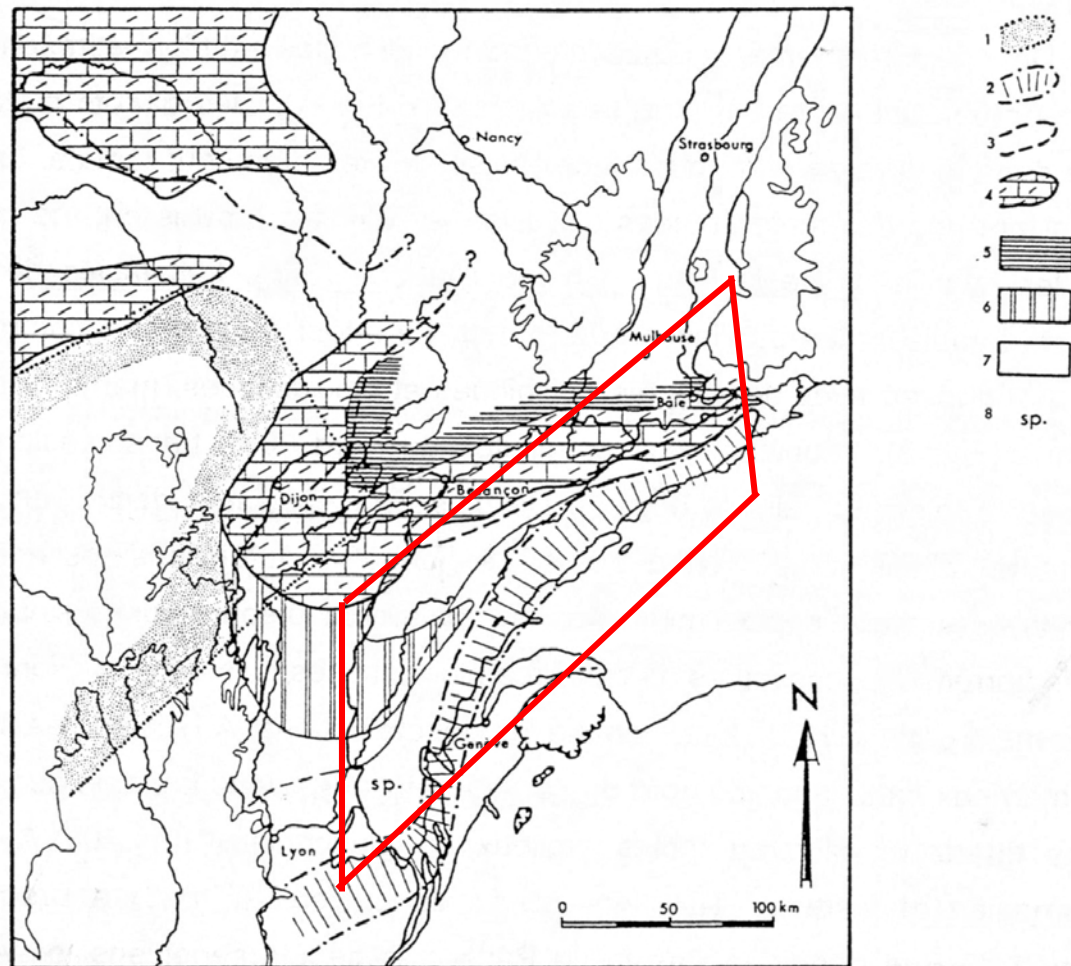
Paléogéographie du Jura et de ses environs au Trias. D'après Chauve et al. (1980).

1: Zones non recouvertes au maximum de l'avancée du Keuper; 2: Faciès détritiques de bordure du Keuper et du Rhétien, éventuellement encore attribuables à l'Héttangien; 3: Avancée du Keuper germanique à évaporites; 4: Principales accumulations de sel gemme; 5: Avancées des faciès germaniques mixtes (calcaires, grès, argiles, dolomies ou anhydrites) du Muschelkalk; 6: Avancée des faciès calcaires (type lorrain ou franc-comtois) du Muschelkalk supérieur; 7: Avancée des faciès détritiques (grès inférieur continentaux) du sommet du Trias inférieur et du Trias moyen basal (Muschelkalk inférieur); 8: Avancée des Grès à Voltzia du Trias inférieur (faciès lorrain); 9: Domaine du Grès vosgien.



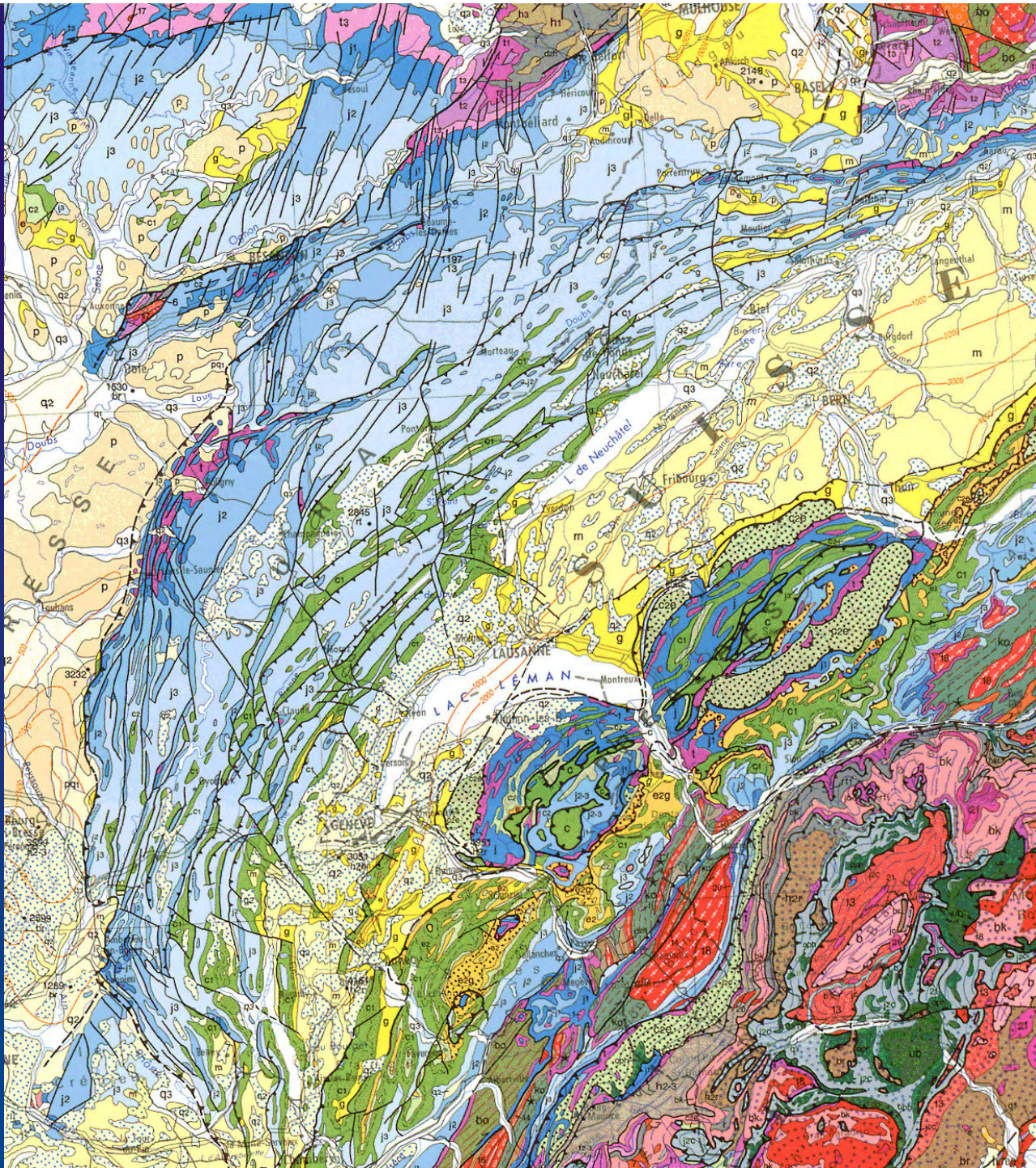


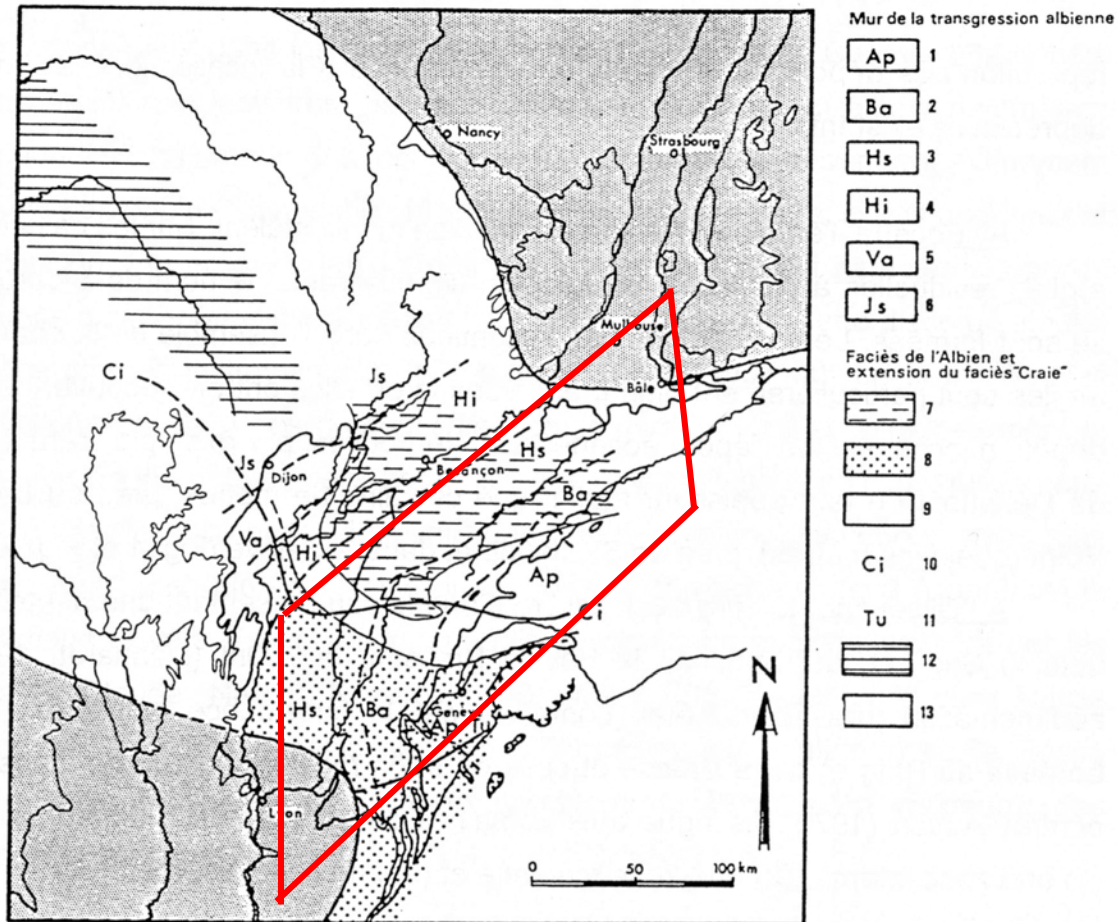




Paléogéographie du Jura et de ses environs à l'Oxfordien. D'après Chauve et al. (1980).

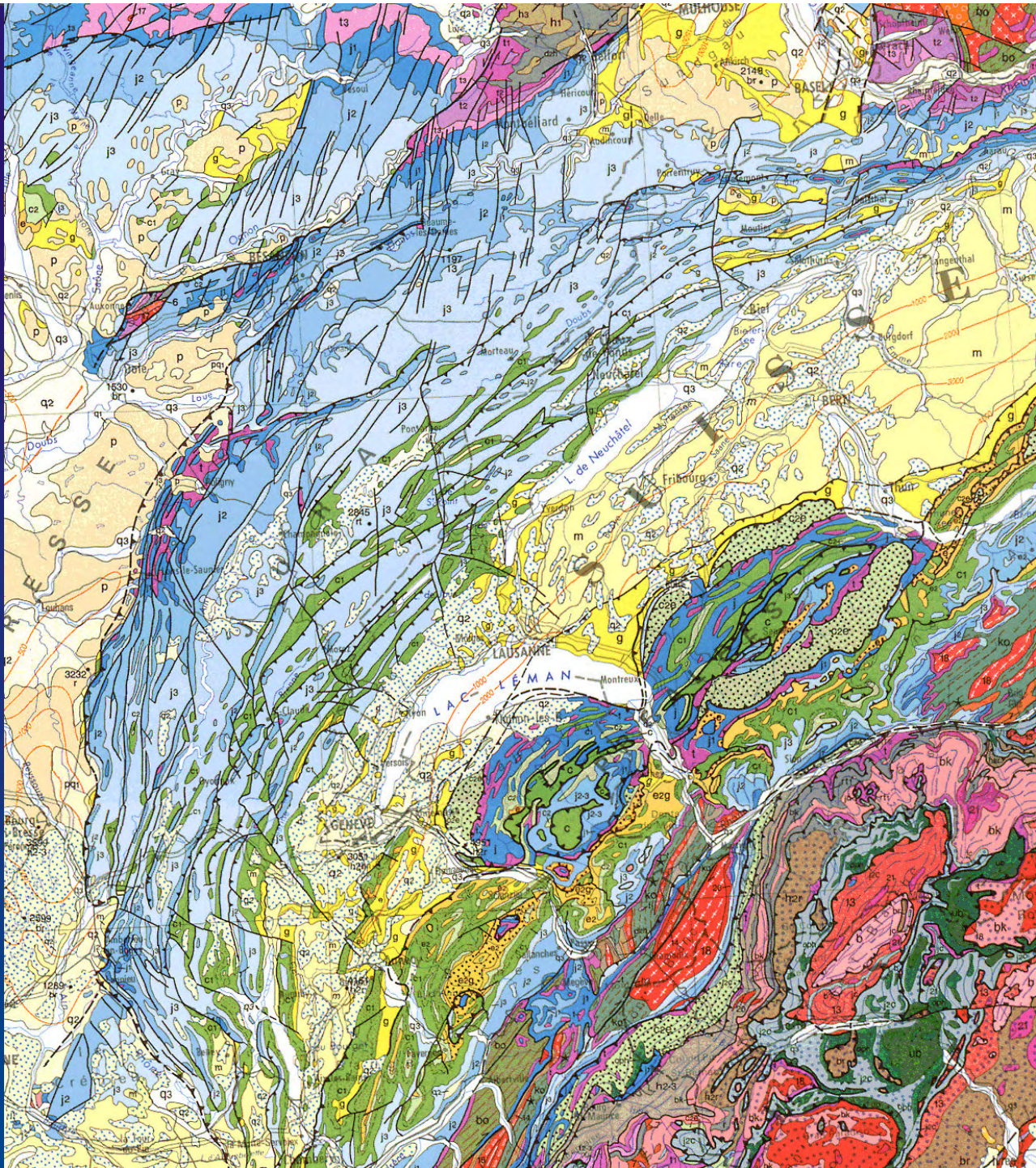
1: Domaine bourguignon (lacune de l'Oxfordien inférieur et de l'oolithe de l'Oxfordien moyen basal); 2: Seuil de la Haute-Chaîne (lacune de l'Oxfordien inférieur et moyen basal); 3: Limite des plates-formes carbonatées de l'Oxfordien moyen; 4: Limite des plates-formes carbonatées de l'Oxfordien supérieur; 5: Faciès protégé de l'Oxfordien supérieur (calcaires fins); 6: Avancée des biostromes oncolithiques au sein des calcaires lités de l'Oxfordien supérieur; 7: Faciès marneux et marno-calcaires de l'Oxfordien moyen et supérieur; 8: Faciès à biothermes des couches de Birmensdorf de l'Oxfordien moyen.

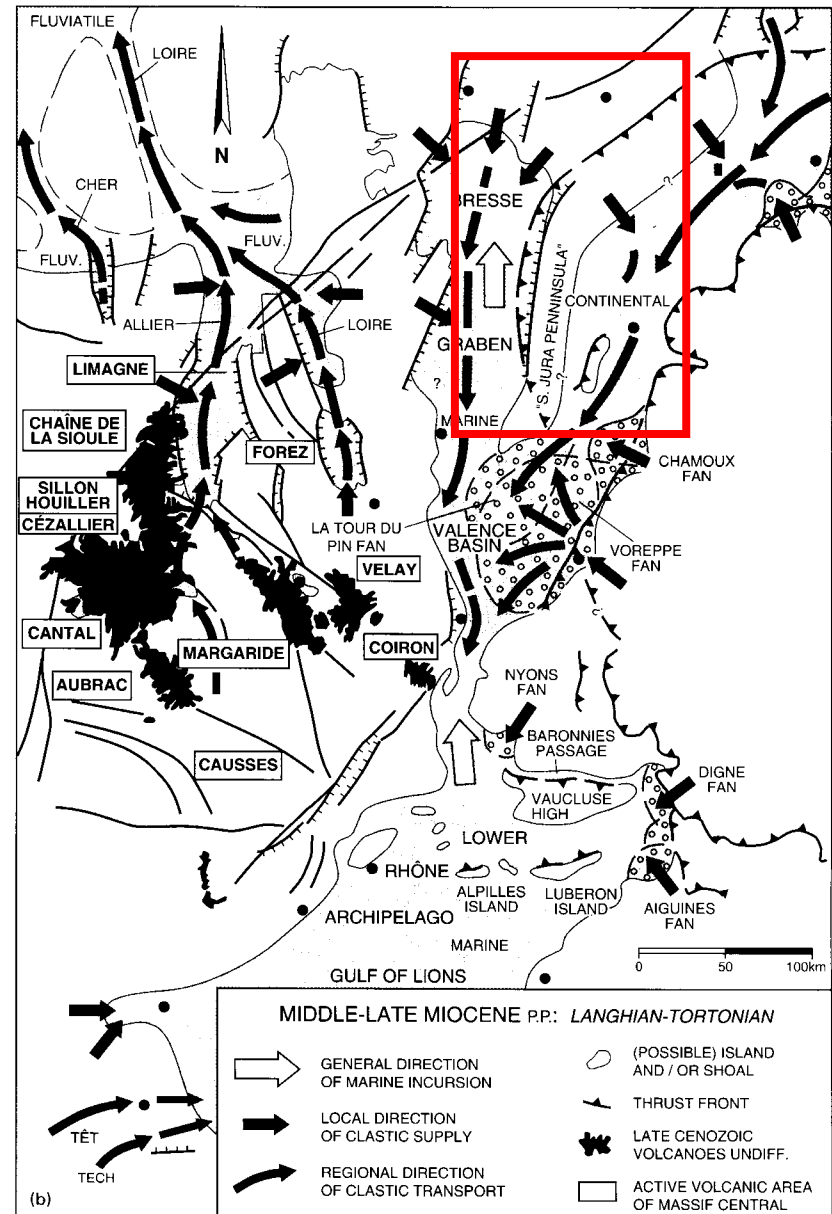
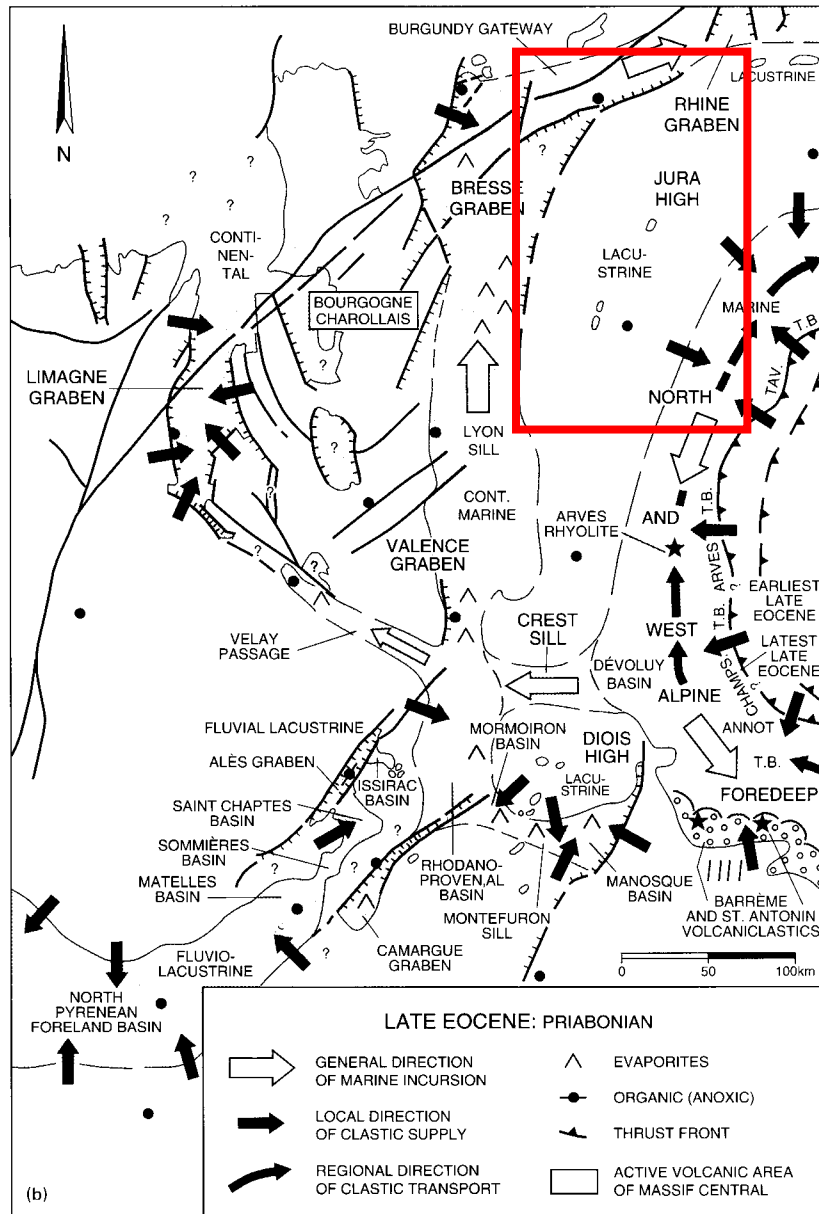




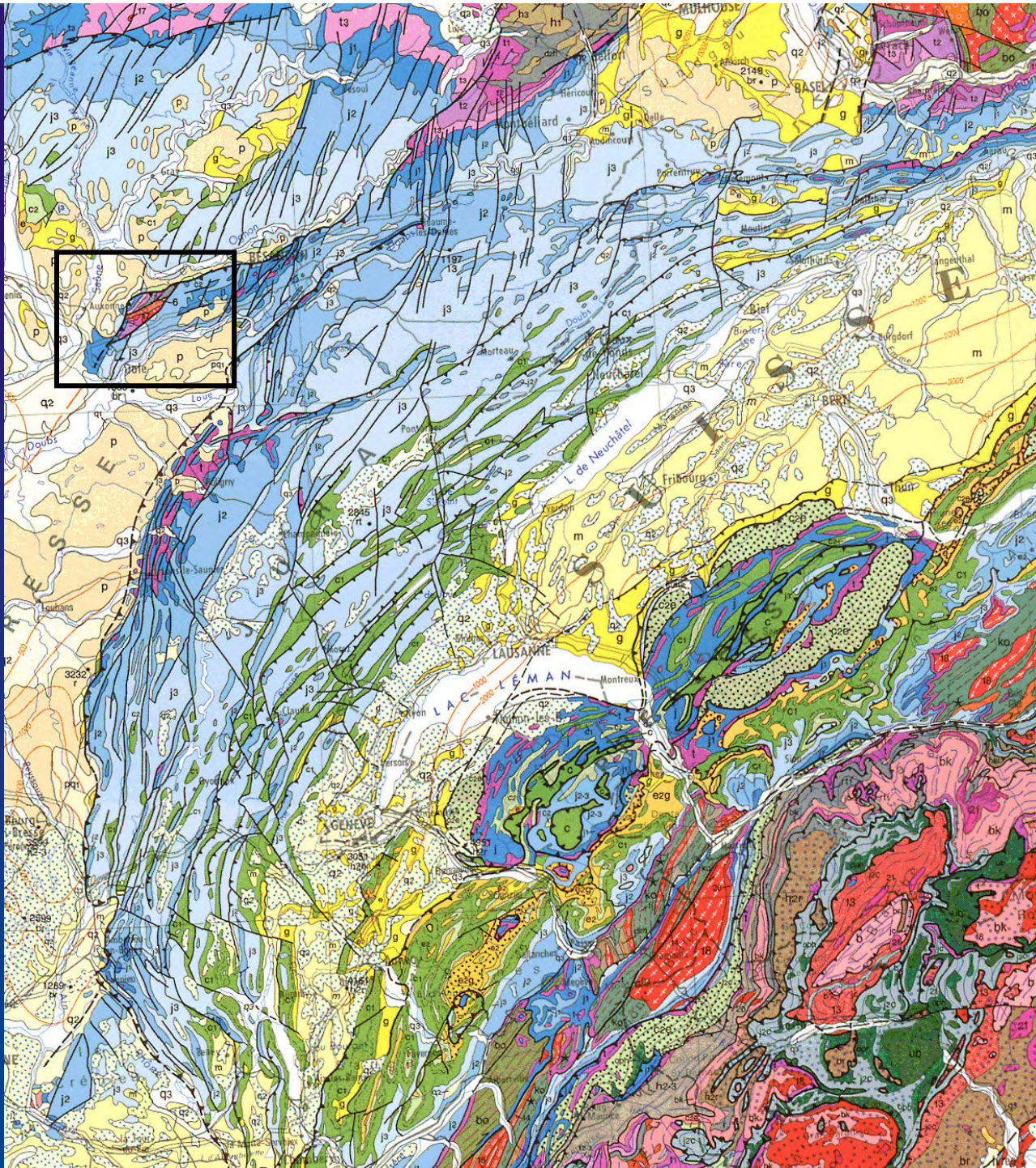
Paléogéographie du Jura et de ses environs au Crétacé supérieur. D'après Chauve et al. (1980).

1: Aptien; 2: Barrémien (localement de l'Aptien conservé en poches ou dans des fissures du Barrémien); 3: Hauterivien supérieur calcaire; 4: Hauterivien inférieur; 5: Valanginien; 6: Jurassique supérieur; 7: Albien marneux directement recouvert par la craie cénomanienne; 8: Albien et Cénomaniens inférieur détritiques; 9: Domaine mixte (grès au sommet de l'Albien, craie parfois glauconieuse de l'Albien et du Turonien); 10: Limite sud de la Craie au Cénomaniens inférieur; 11: Limite sud de la craie du Turonien; 12: Faciès marneux du Cénomaniens inférieur; 13: Terres émergées probables.

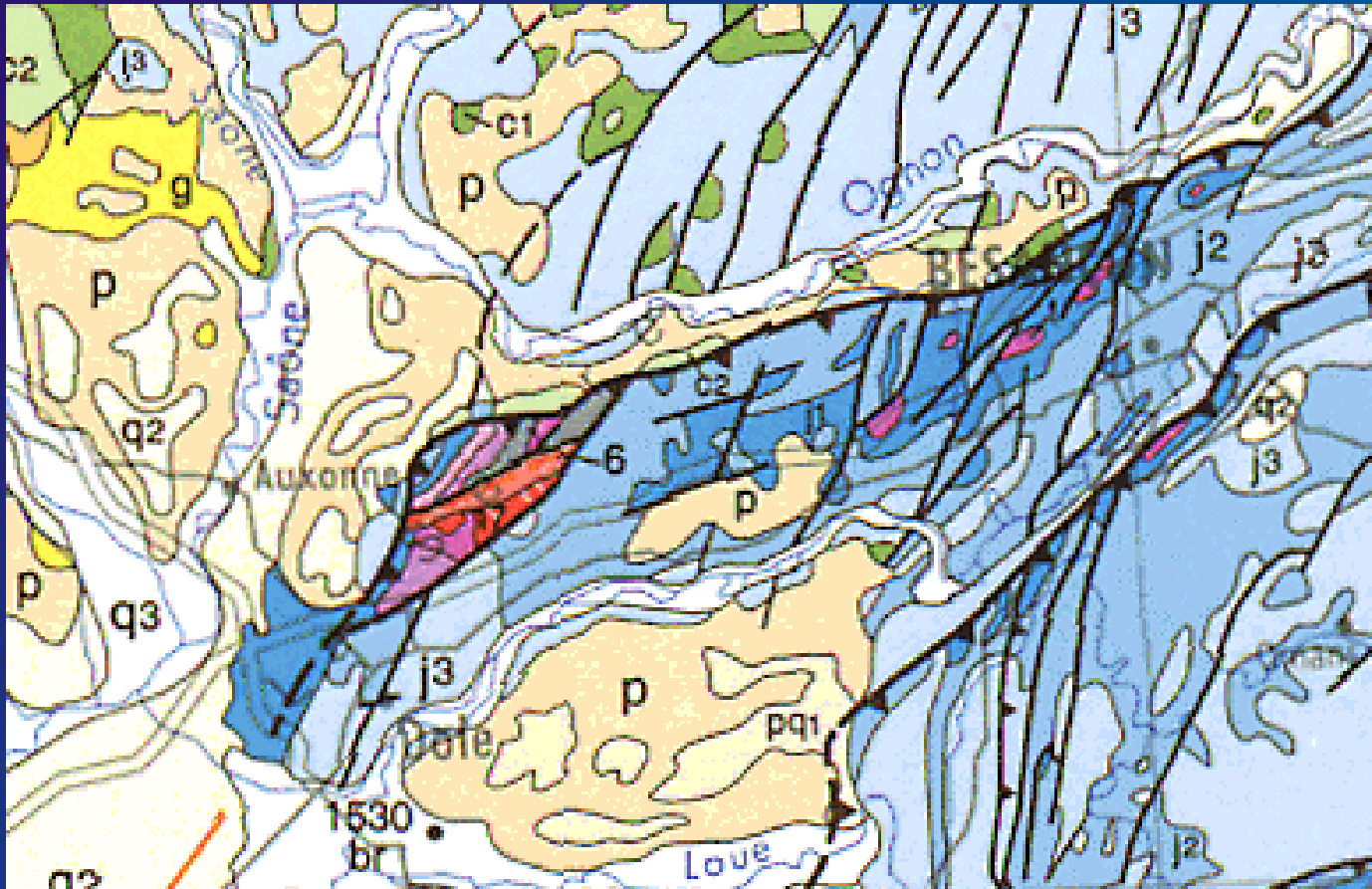




(Sissingh, 1998)



Le socle de la Serre



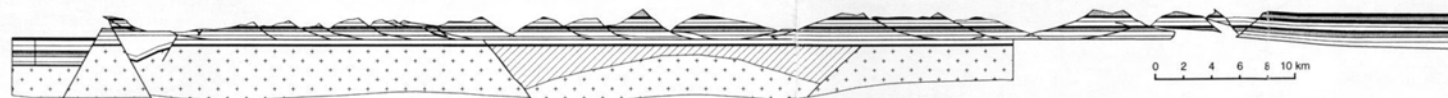
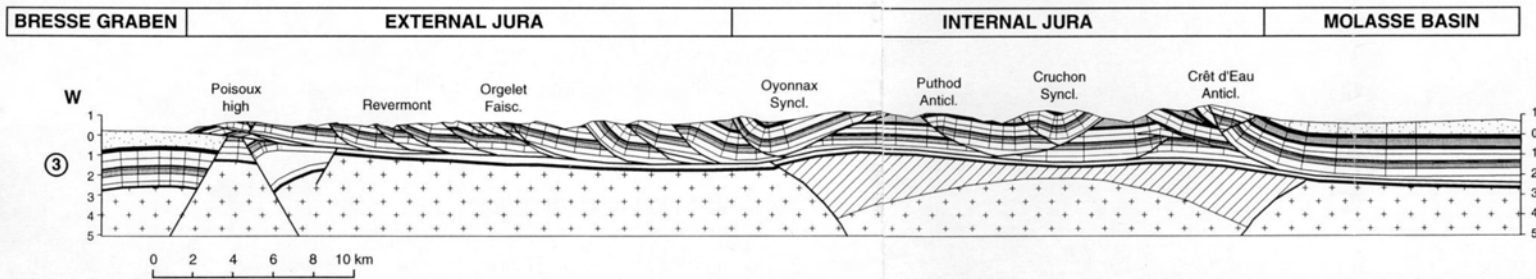
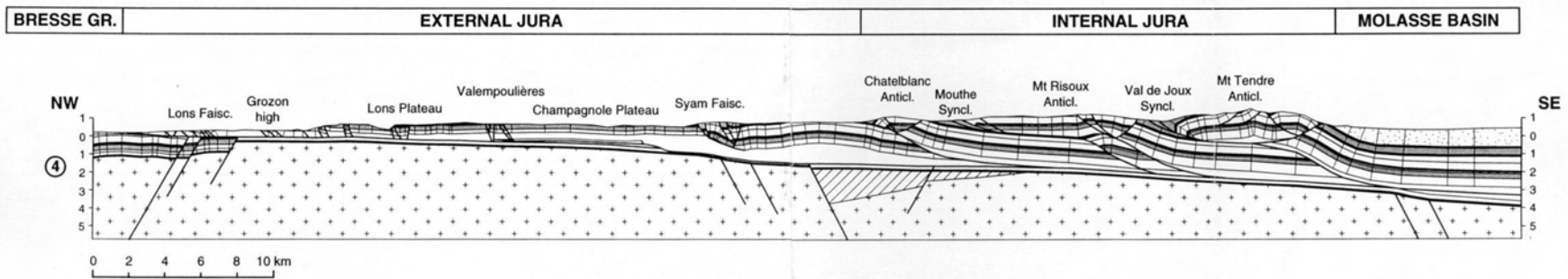


Le style structural du Jura



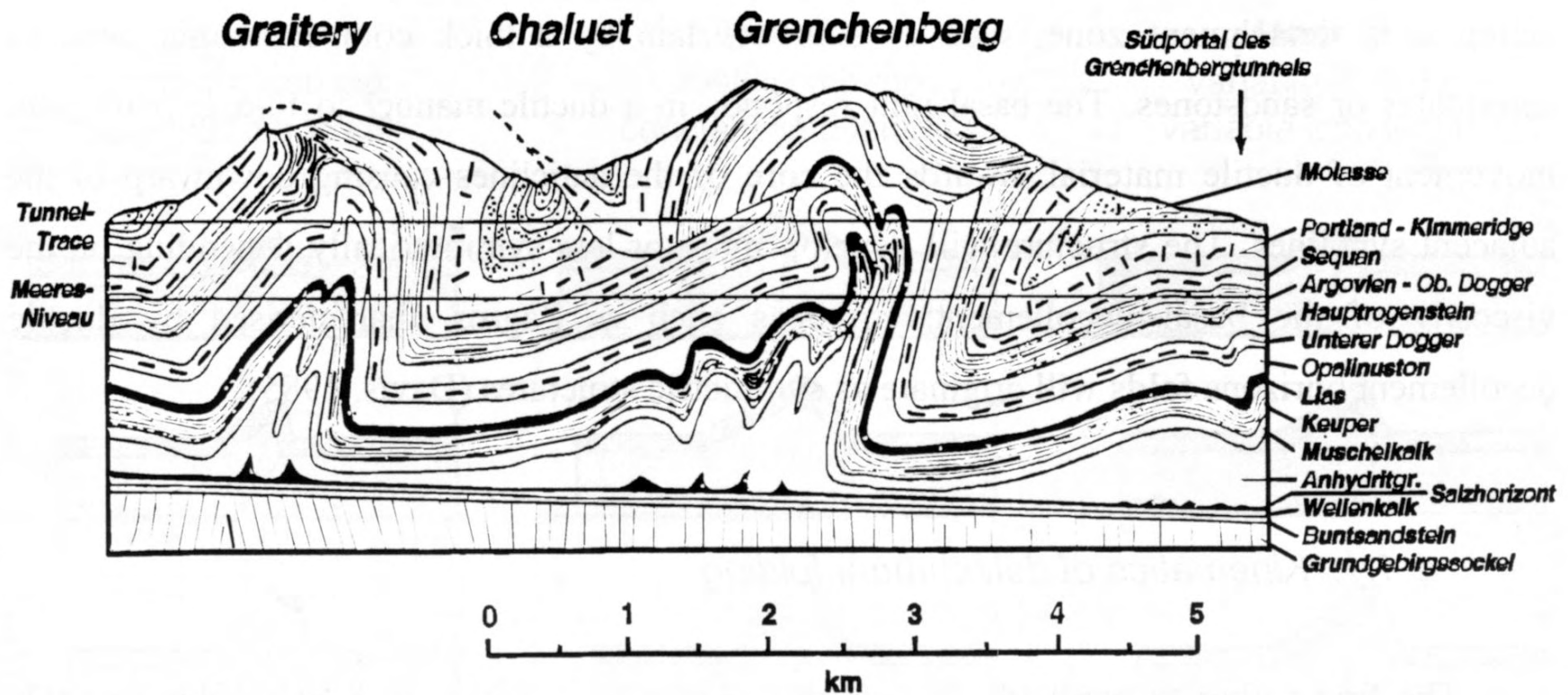


(Philippe, 1995)

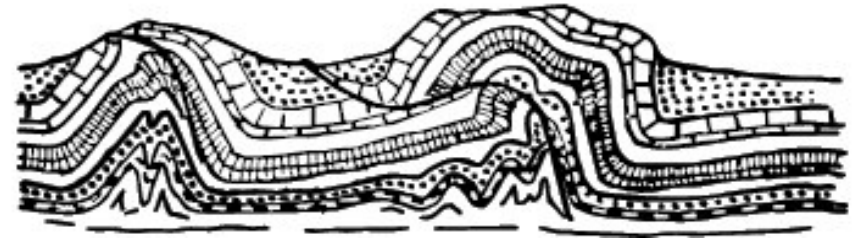
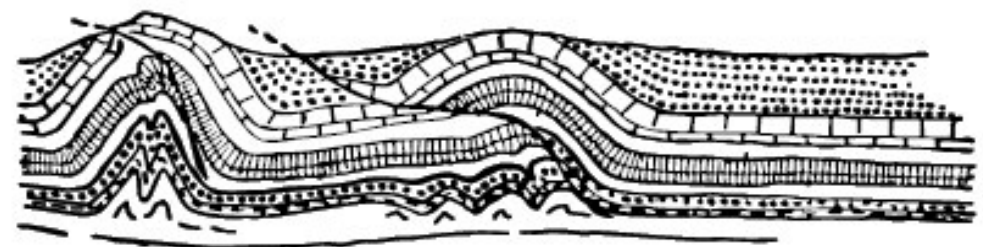
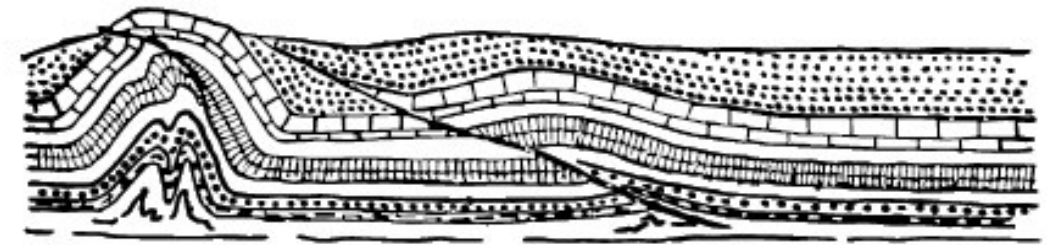
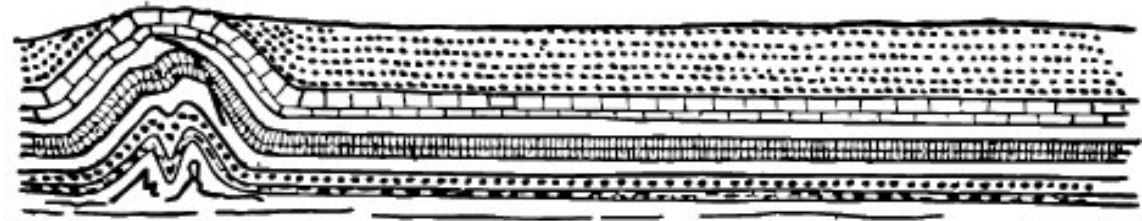
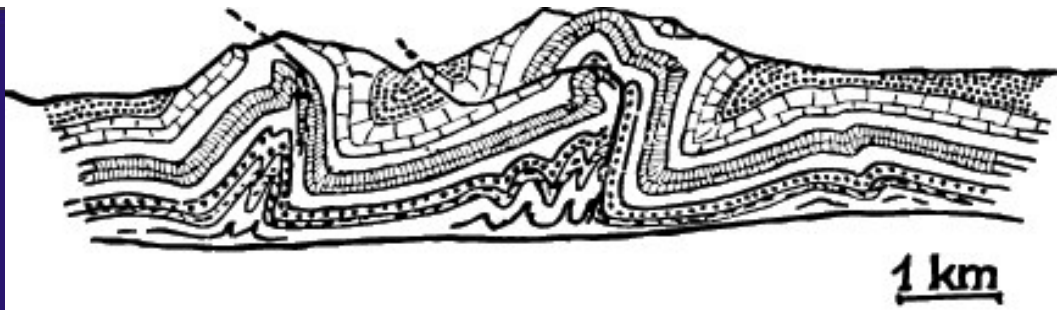






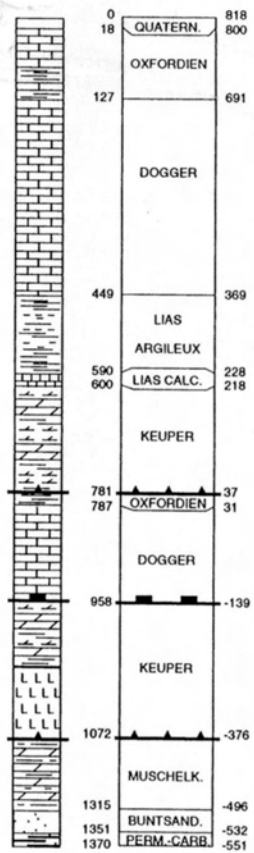


Example of detachment anticlines in the Jura Mountains, Switzerland. Redrawn by (Epard, 1993) from (Buxtorf, 1916). No vertical exaggeration.

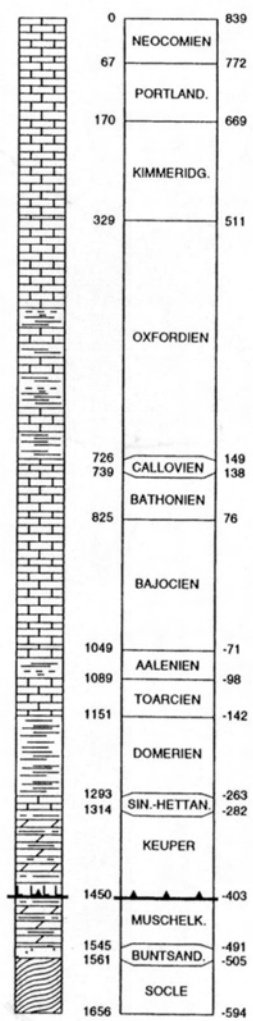


(Buxtorf, 1916)

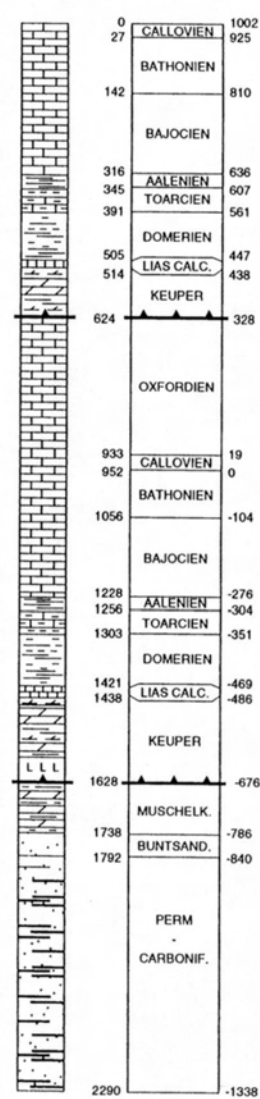
CHALEYRIAT 1



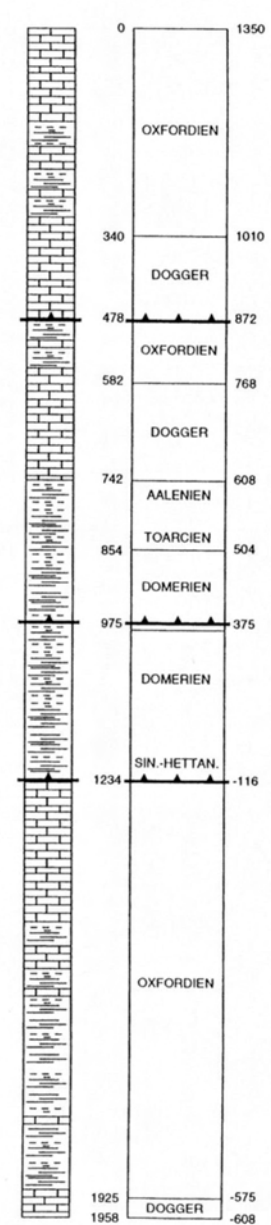
LA CHANDELIÈRE 1D



CHARMONT 1

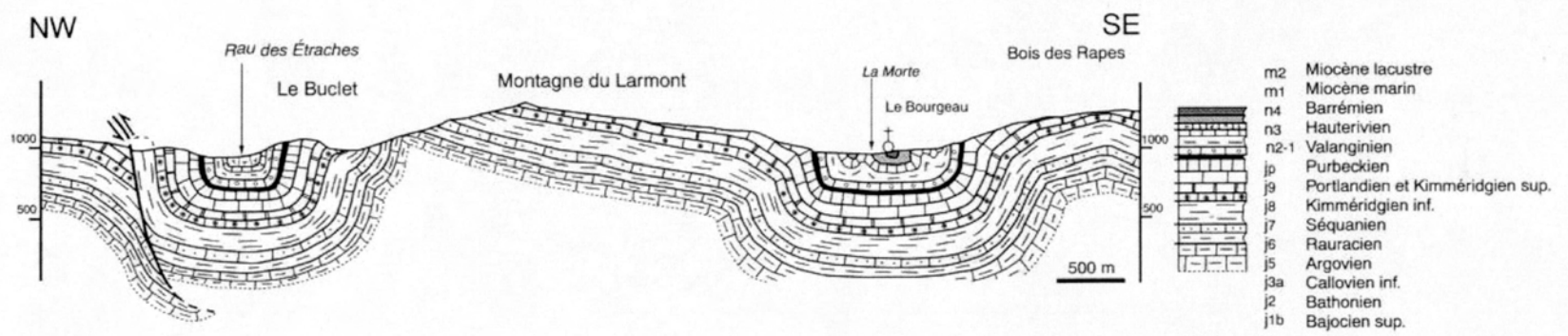


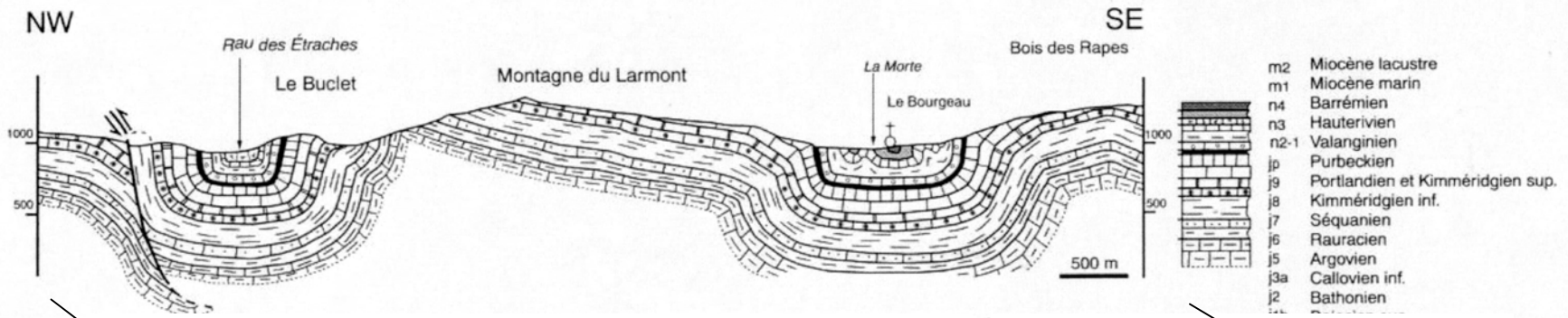
RISOUX 1



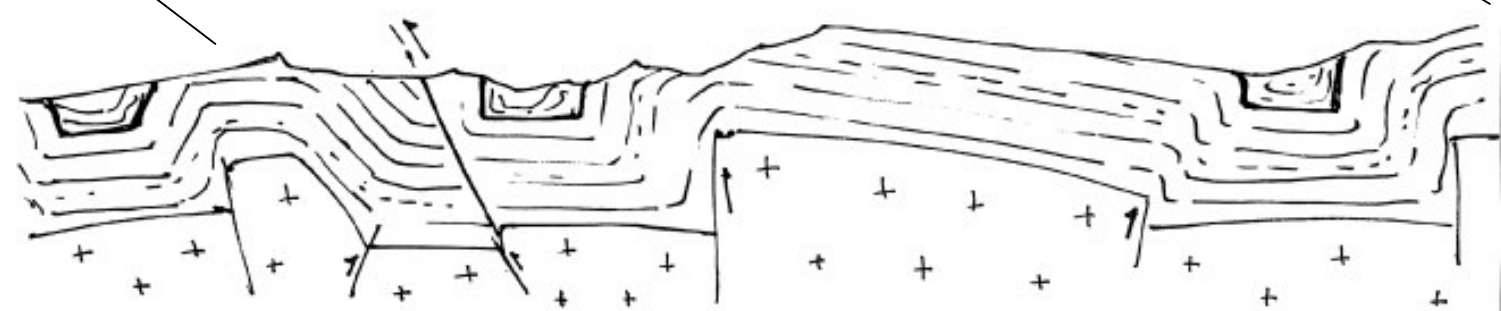
(Philippe, 1995)

Colonnes lithostratigraphiques des forages pétroliers implantés dans la Haute-Chaîne du Jura.

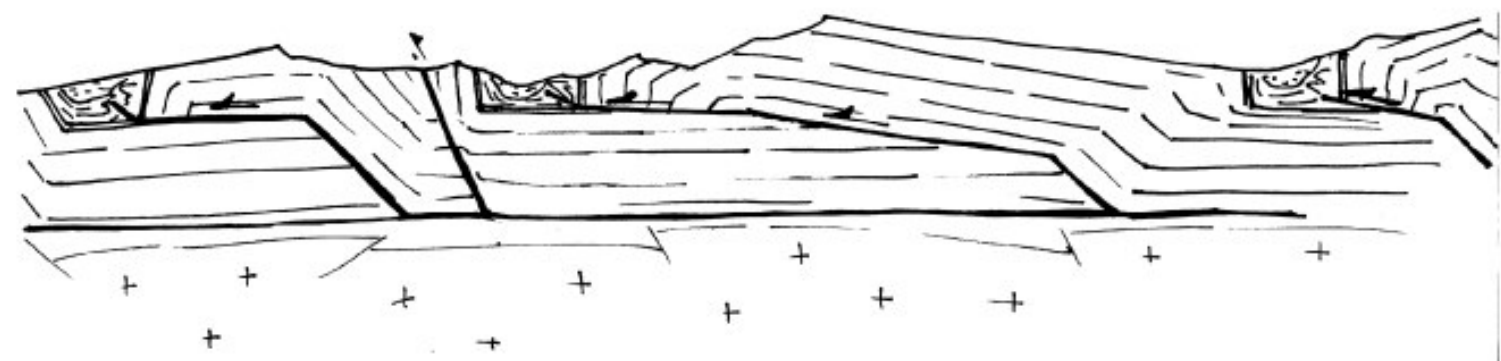




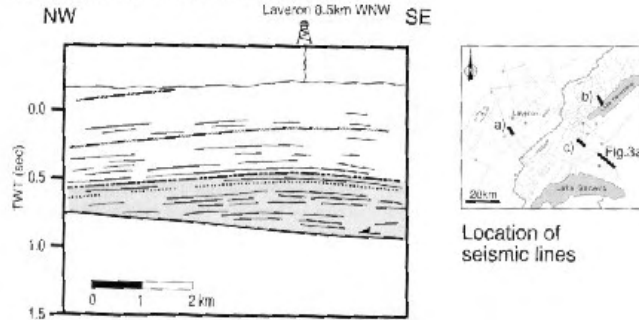
Interprétation 1: Plis coffrés



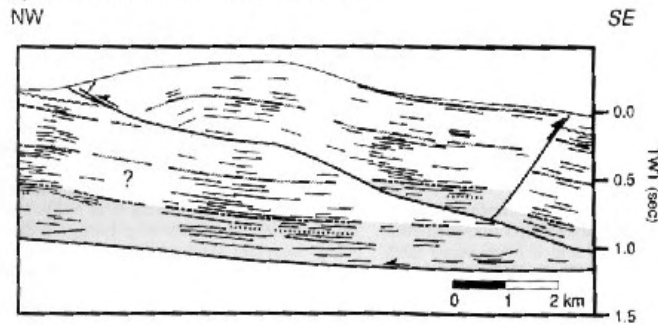
Interprétation 2: Chevauchements en plats et rampes



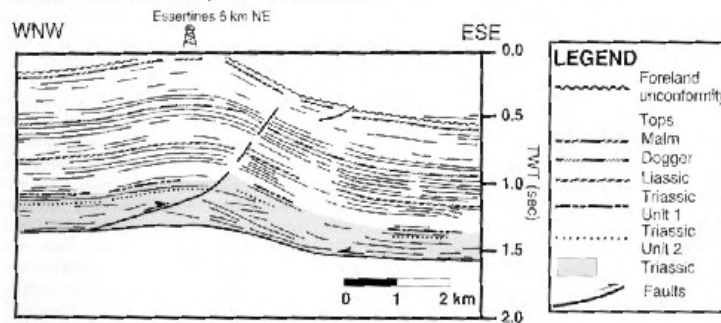
a) Plateau Jura: evaporite-related fold



b) Haute Chaîne Jura: thrust-related fold



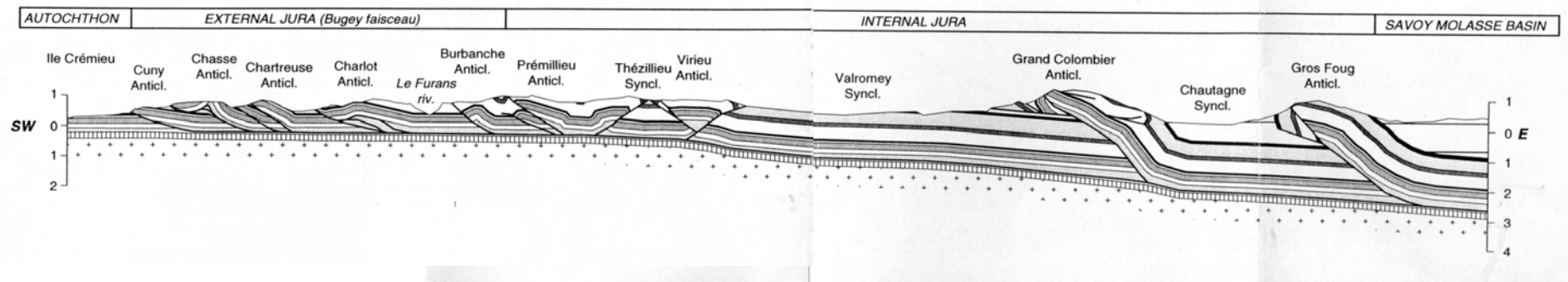
c) Molasse Basin: evaporite-related fold



LEGEND	
	Foreland unconformity
	Tops
	Malm
	Dogger
	Triassic
	Triassic Unit 1
	Triassic Unit 2
	Triassic
	Faults

Line drawings of examples of typical fold structures in the Jura and the Molasse basin. Horizontal scale is in km, vertical scale is in seconds two way travel time. Triassic series are highlighted in grey. Plateau Jura and Molasse basin examples represent low-amplitude evaporite-related "buckle" folds. The Haute Chaîne Jura example presents a high amplitude thrust-related fold (modified from Sommaruga 1995).

(Burkhard et Sommaruga, 1998)



(Philippe, thèse, 1995)

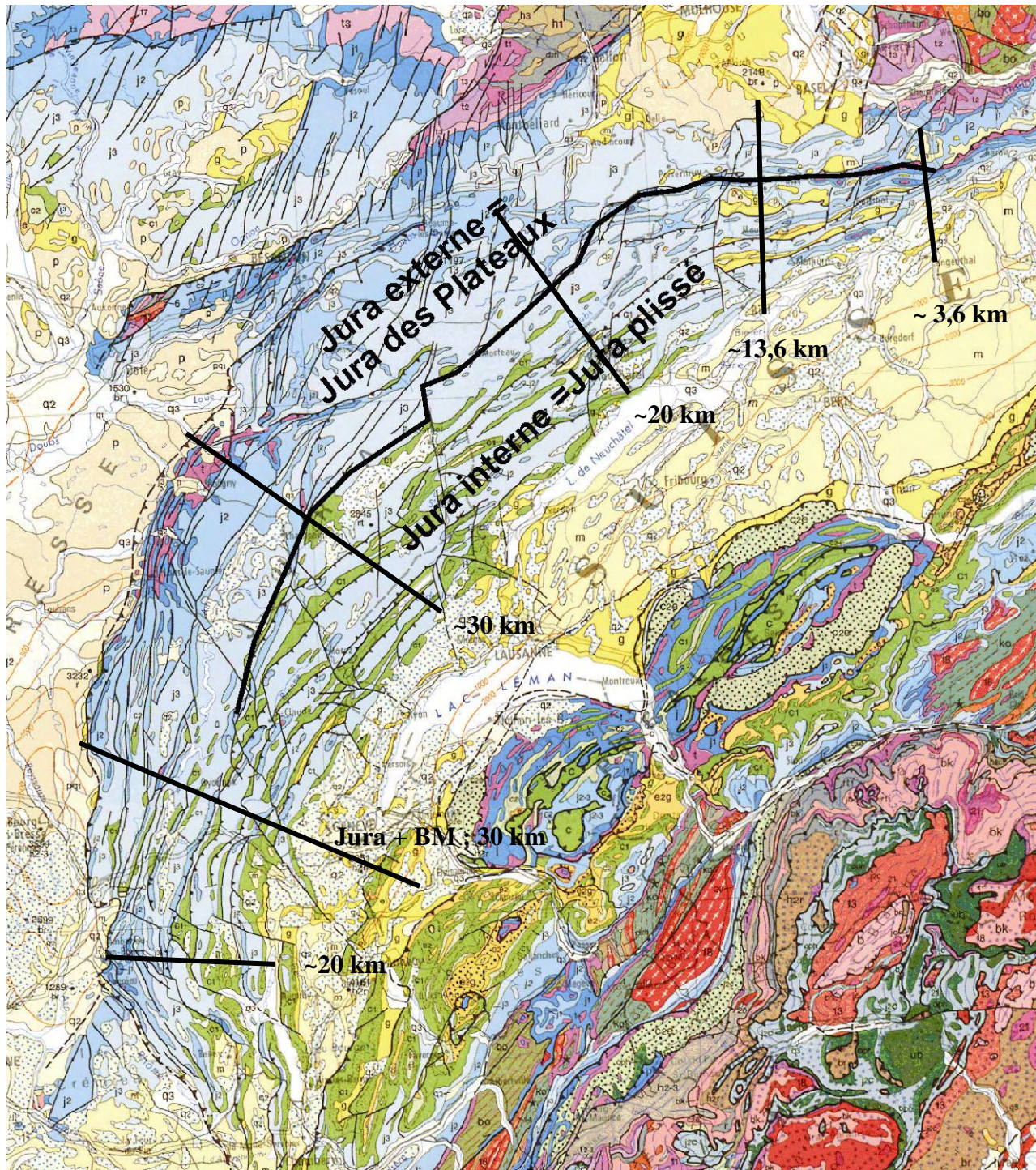
Laubscher (1965) estime le raccourcissement de la couverture du Jura dans le Jura central à la hauteur du Risoux à 25-30km. Dans la même région, Philippe (1995) propose une valeur de 31km.

Vers le Nord-Est, le raccourcissement qu'a absorbé la couverture du Jura diminue jusqu'à s'annuler à son extrémité est. A la hauteur de Neuchâtel, le raccourcissement est estimé à 20.3km. Au niveau du Jura de Ferrette, il est de 13.6km. La structure de l'anticlinal de Lâgern (terminaison est du Jura), qui représente la dernière structure compressive de la couverture du Jura, absorbe un raccourcissement de 3.6 km.

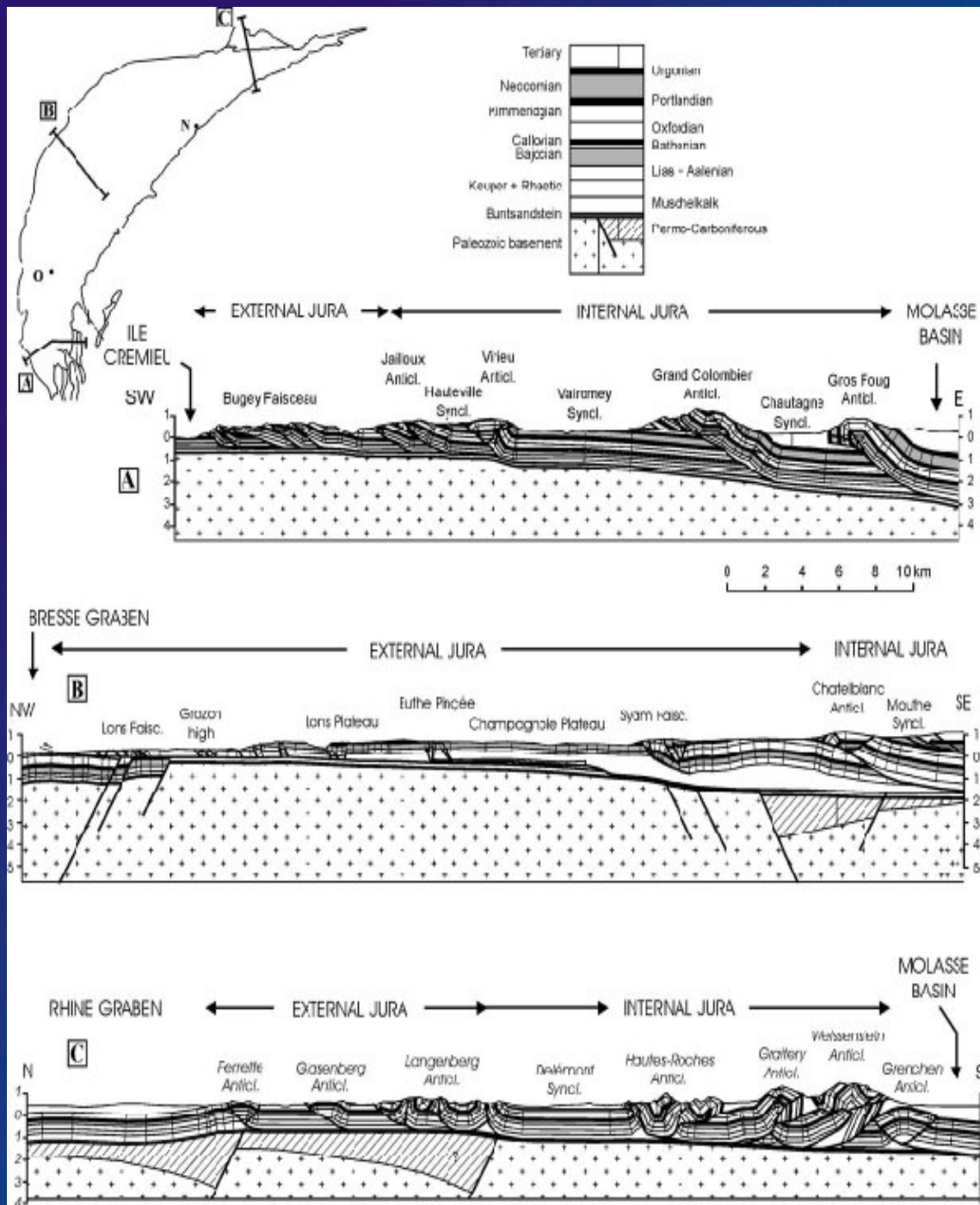
Vers le Sud-Ouest, la quantité de raccourcissement du Jura diminue aussi mais de manière moindre. Sur la transversale du profil ECORS, à peu près à la hauteur d'Oyonnax, Guellec et al. (1990) chiffrent le raccourcissement de la couverture du Jura au sens large, c'est à dire le Jura à proprement parler et le Bassin Molassique Suisse, à 30km (ce qui correspond à une déformation de 41 %).

Dans le Jura méridional, le raccourcissement est de 31 km au niveau de Nantua (10km au Nord d'Oyonnax) et de 19.5km au niveau du faisceau du Bugey (Philippe, 1995). Plus au Sud, le raccourcissement de la couverture du Jura est localisé dans les chaînons jurassiens et correspond à une dizaine de kilomètres.

Le maximum de raccourcissement de la couverture du Jura se situe donc dans le Jura central (Philippe, 1995). Ce raccourcissement est en majeure partie accommodé dans le Jura interne. A la hauteur du tracé du profil ECORS, le Jura externe n'absorbe que 6 des 30km du raccourcissement total. Il semble que la totalité du raccourcissement subi par la couverture des zones externes des Alpes (Jura et Bassin Molassique Suisse) soit à peu près constante et égale en moyenne à 25 km (Burkhard, 1990). La diminution du raccourcissement de la couverture du Jura au sens strict est donc compensée par une augmentation du raccourcissement de celle du Bassin Molassique Suisse, localisé essentiellement dans la molasse subalpine.

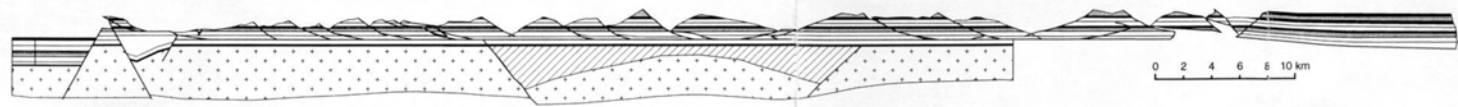
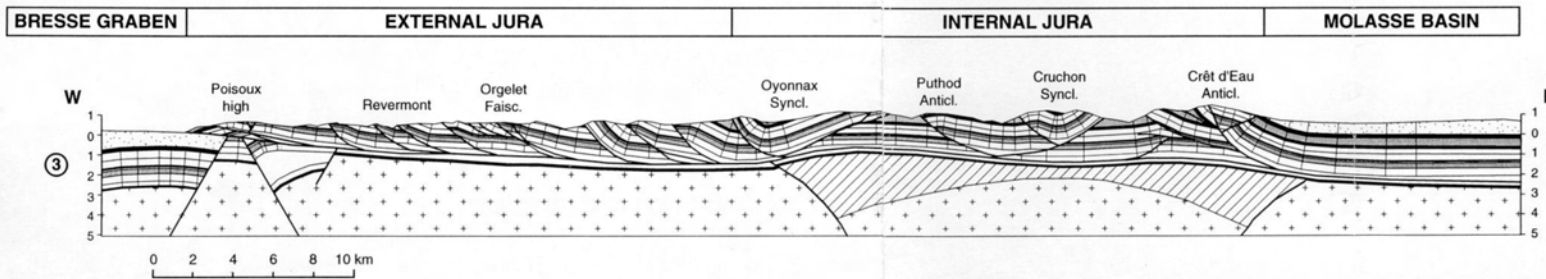
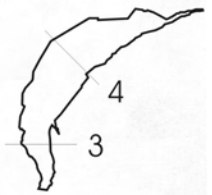
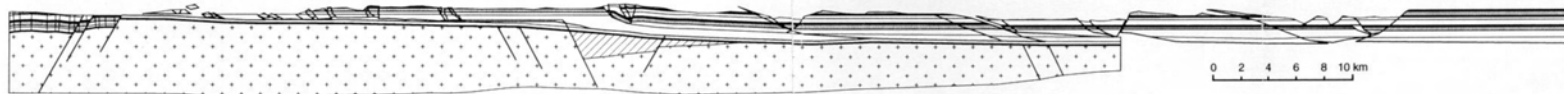
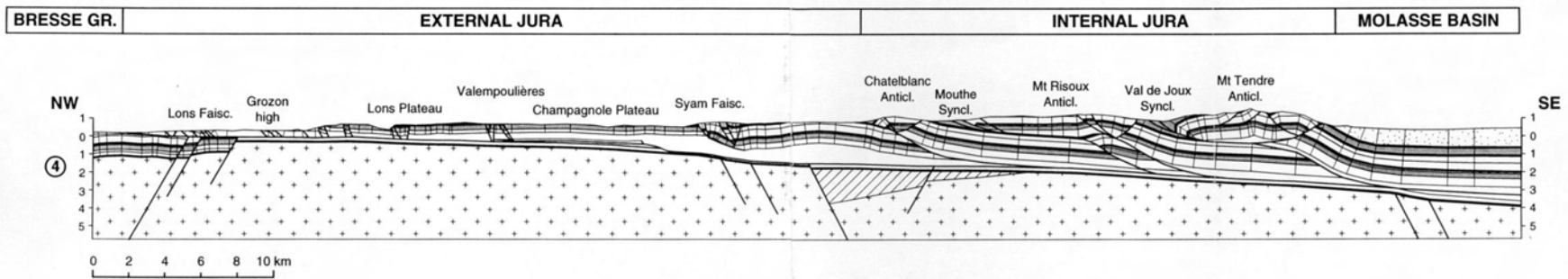


Le Jura :
Une chaîne de couverture Mio-Pliocène
décollée au niveau du Trias...

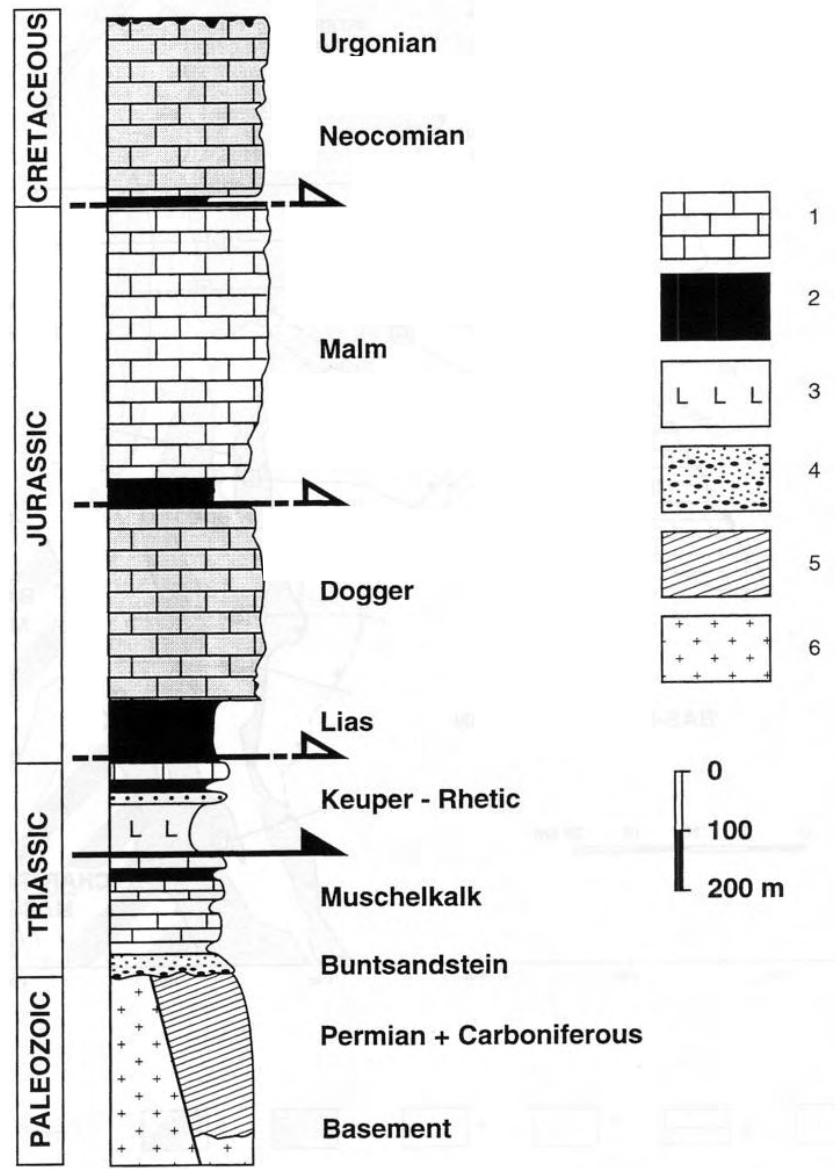


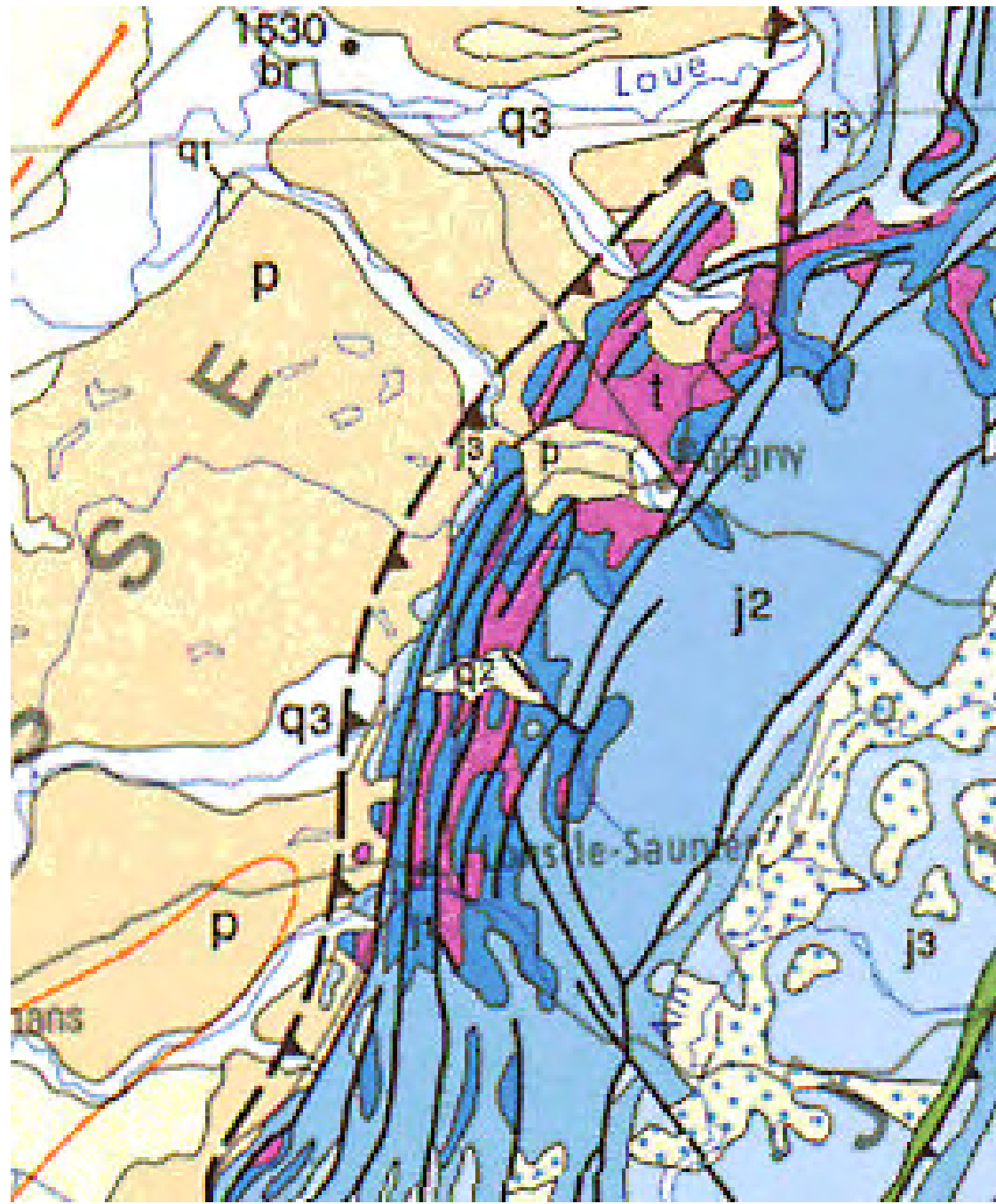
(Philippe, 1995;
Homberg et al. 2002)

(Philippe, 1995)

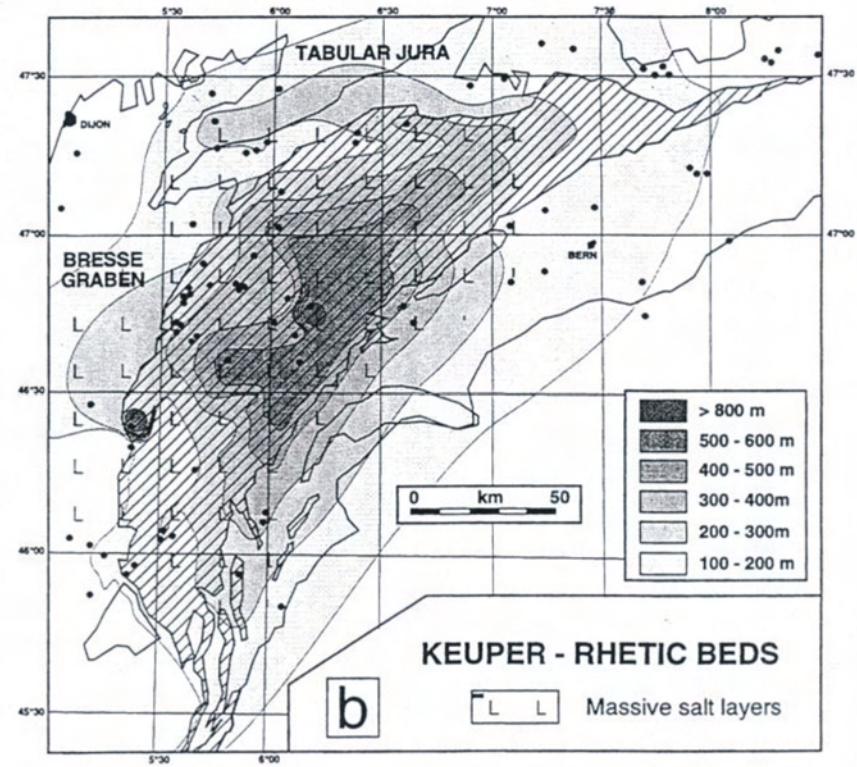
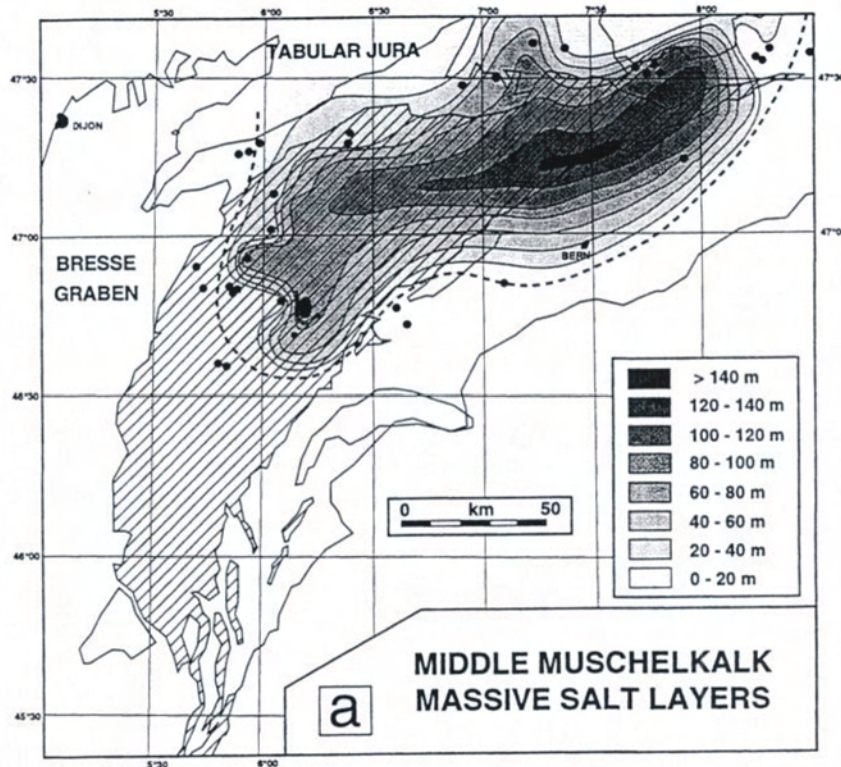


**Décollement majeur
dans le Trias**



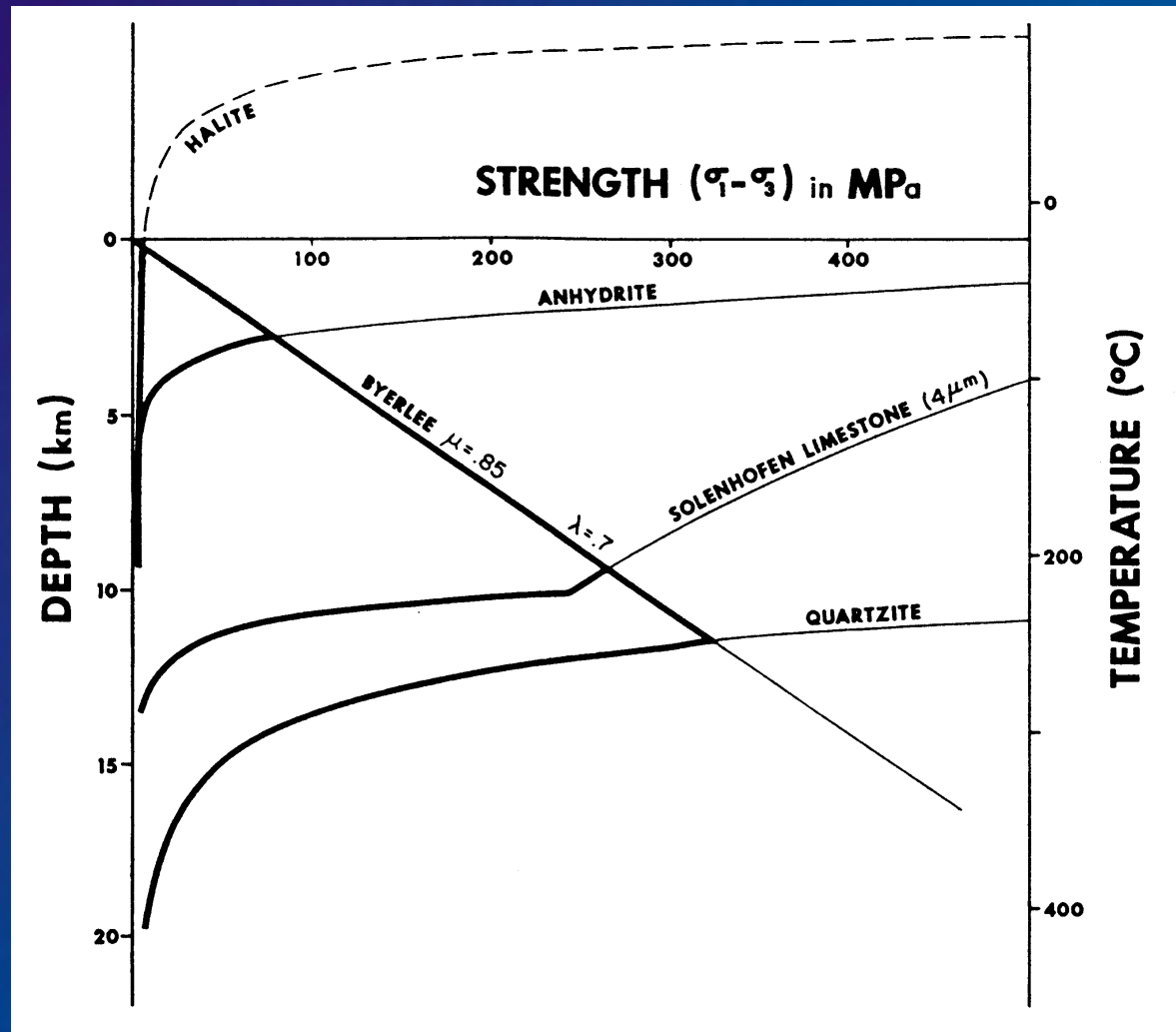


Répartition des évaporites du Trias sous le Jura

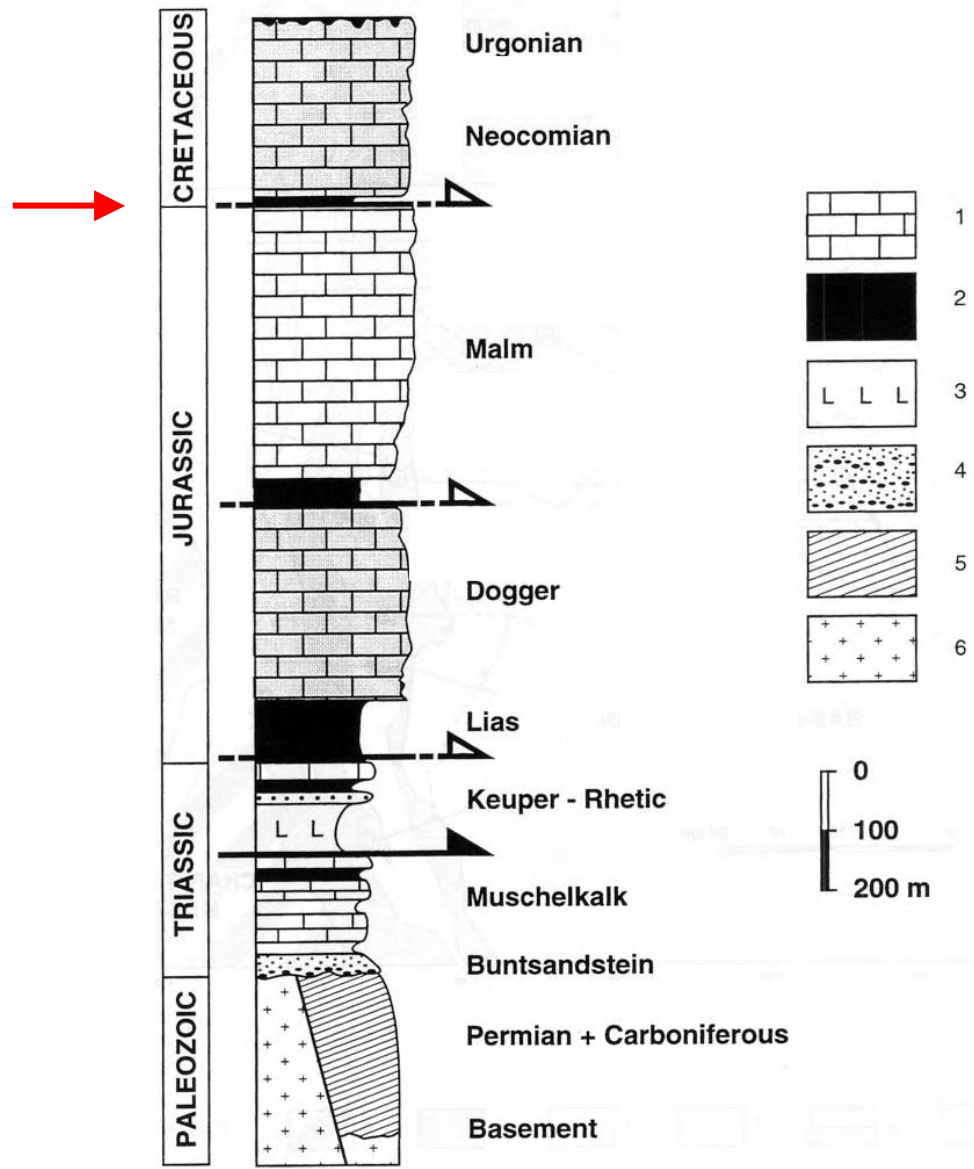


(Lienhard, 1984)

Comportement mécanique des évaporites du Trias

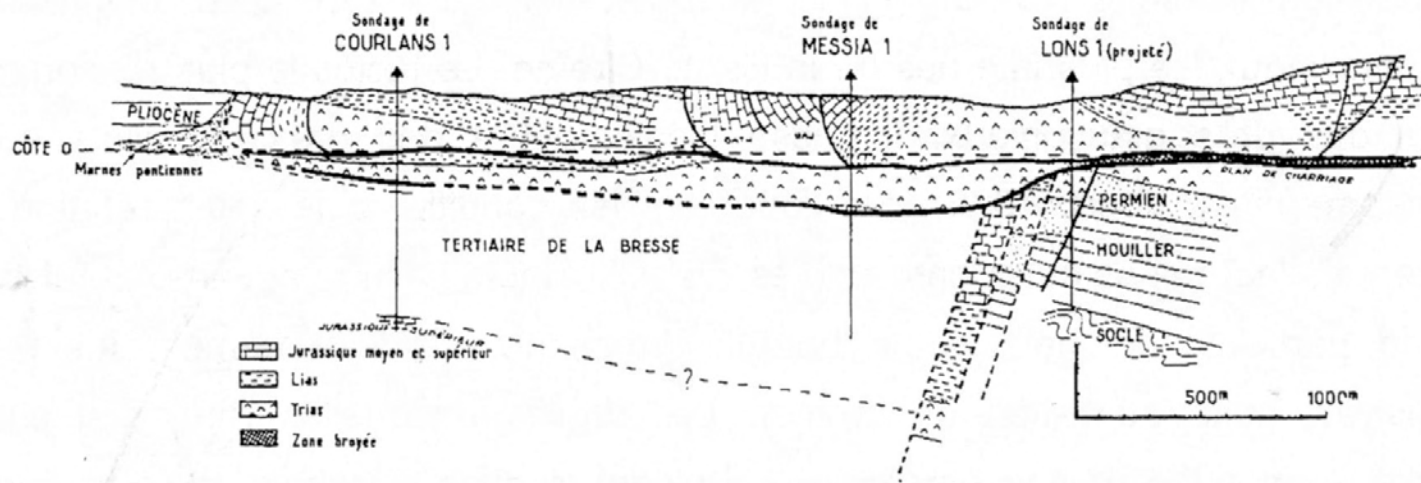


**Décollement
secondaire
dans le Purbéckien**

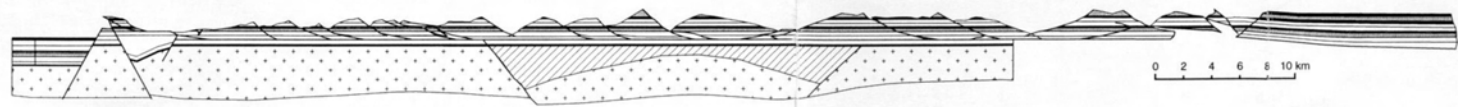
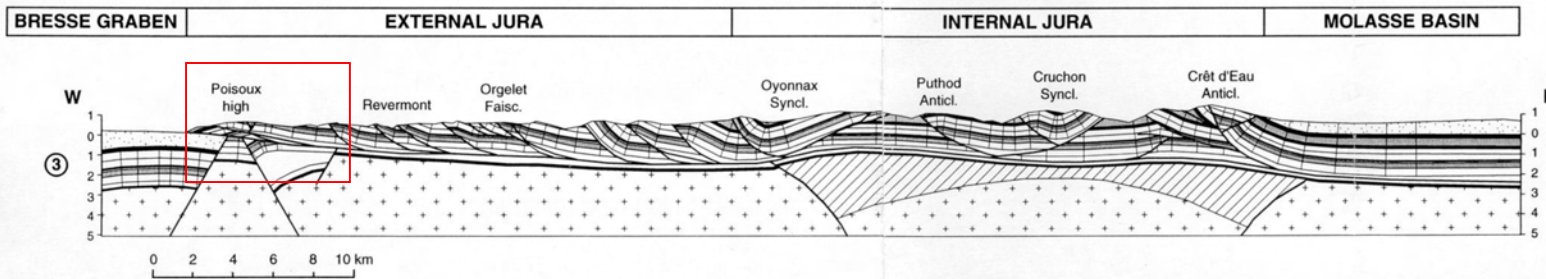
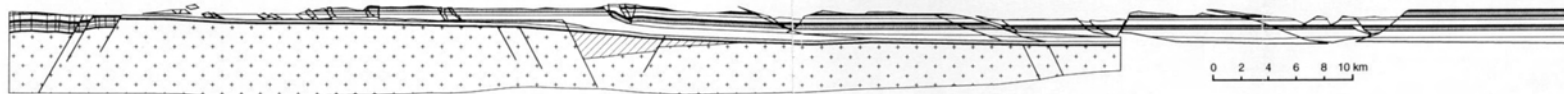
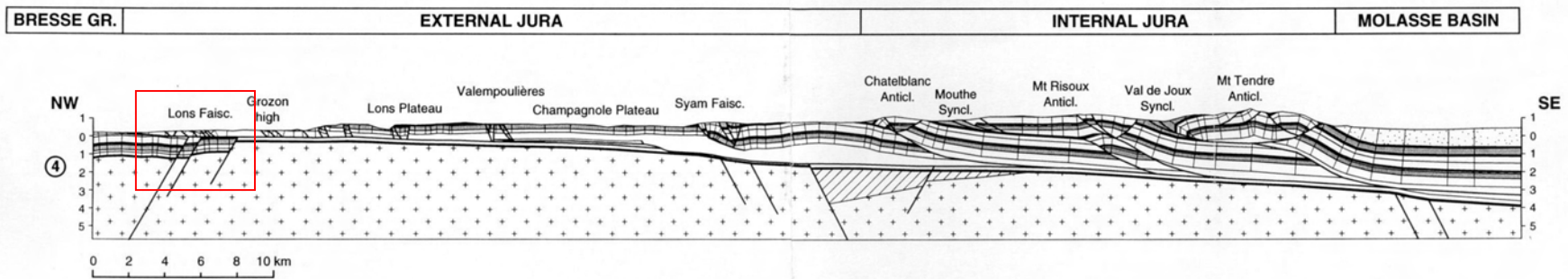




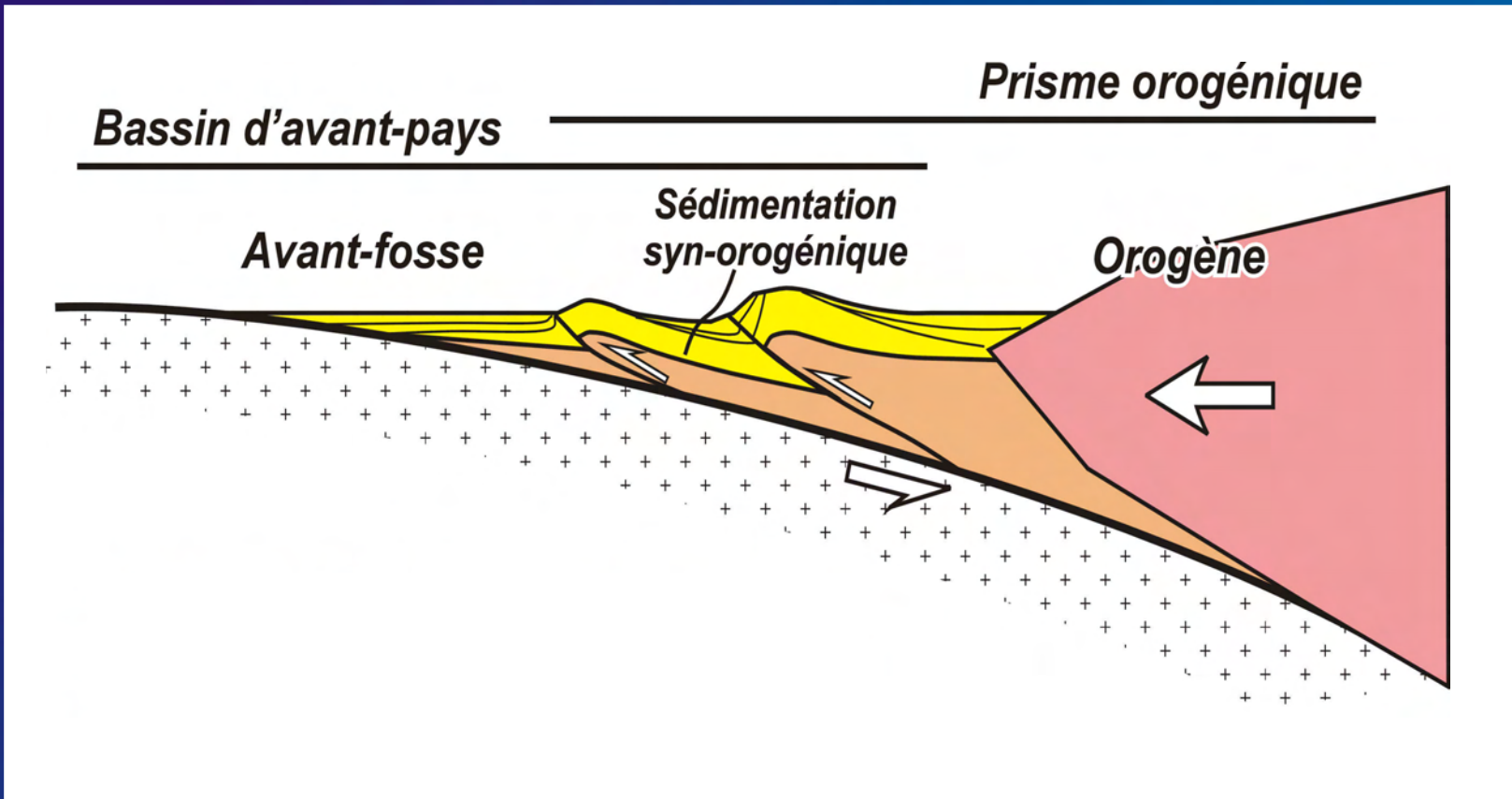
**... chevauchante sur les fossés
de la Bresse et du Rhin...**



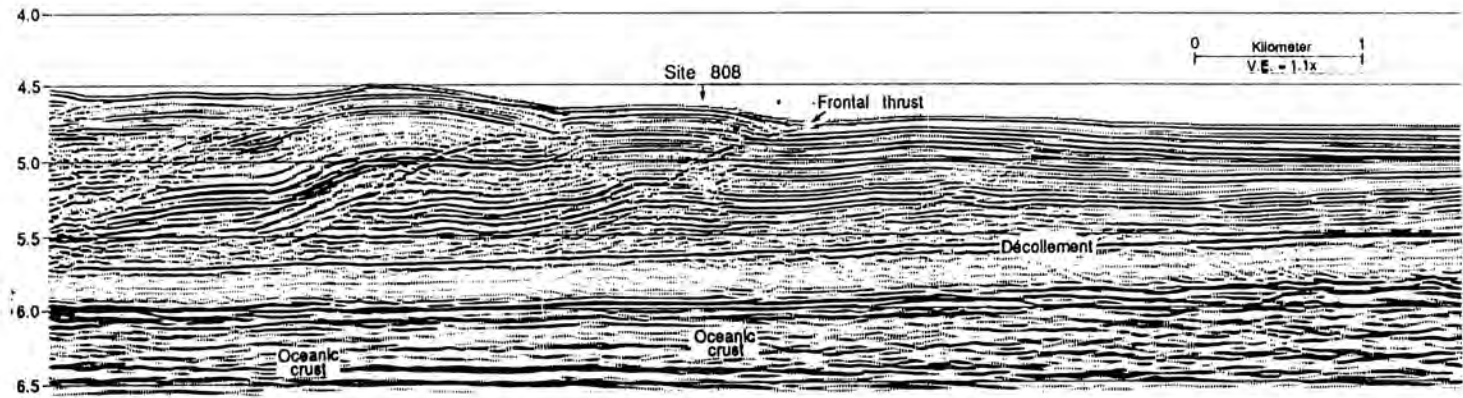
(Philippe, 1995)



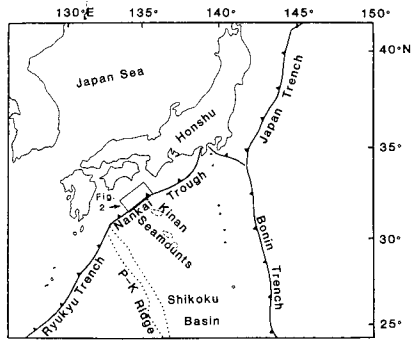
**... analogue à un prisme d'accrétion
sédimentaire des zones de subduction ...**



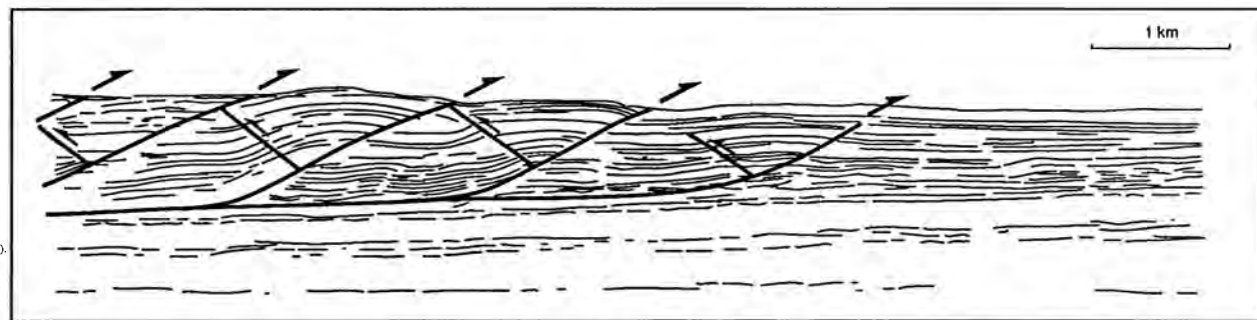
Equivalents émergés des prismes d'accrétion océanique



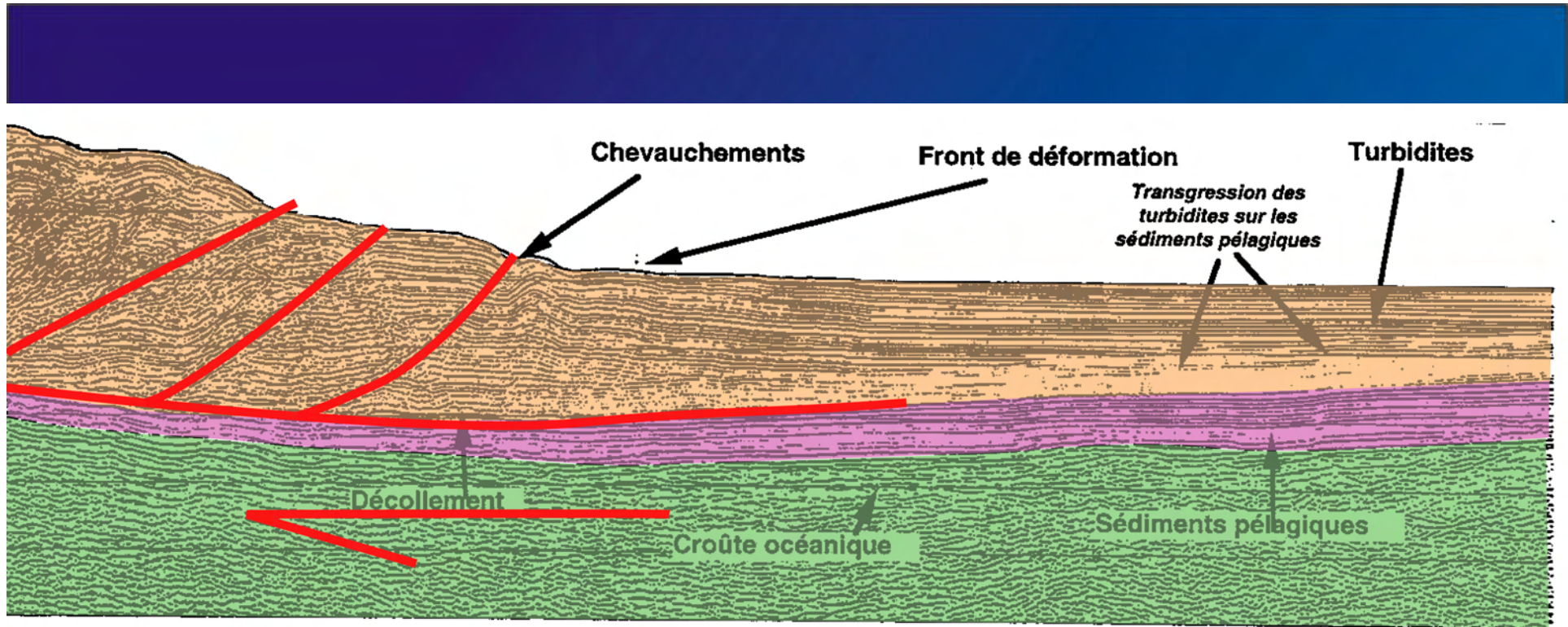
prisme de Nankai 2 (Moore *et al.*, 1991).



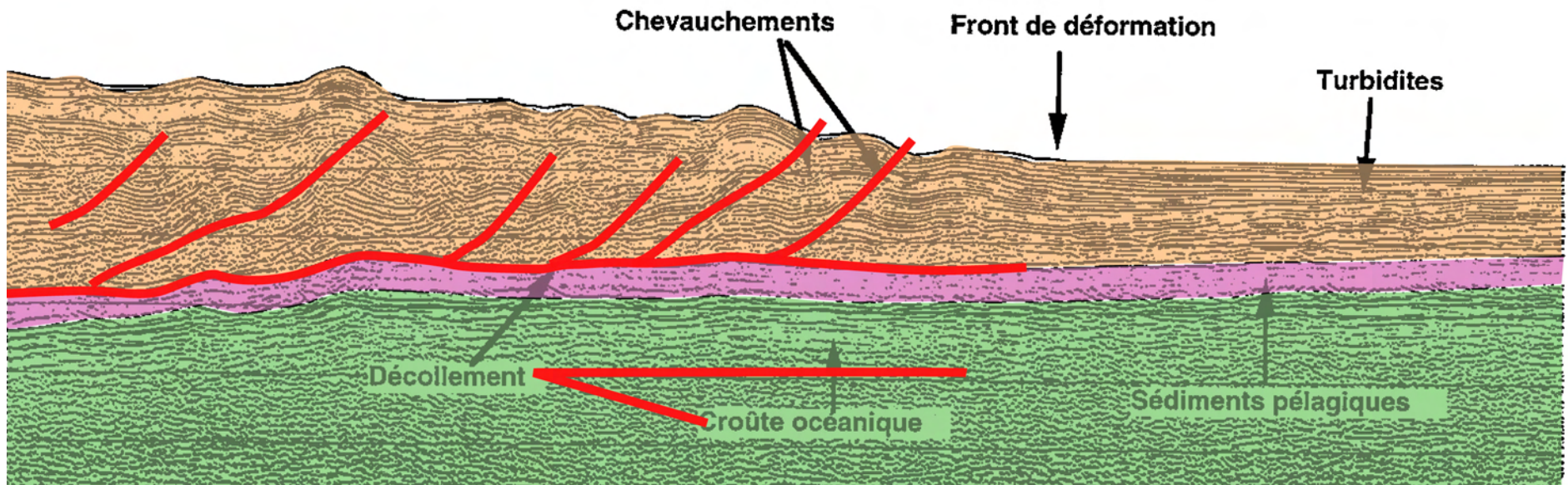
Regional tectonic map showing setting of the Nankai Trough study area (box labeled as Figure 2).



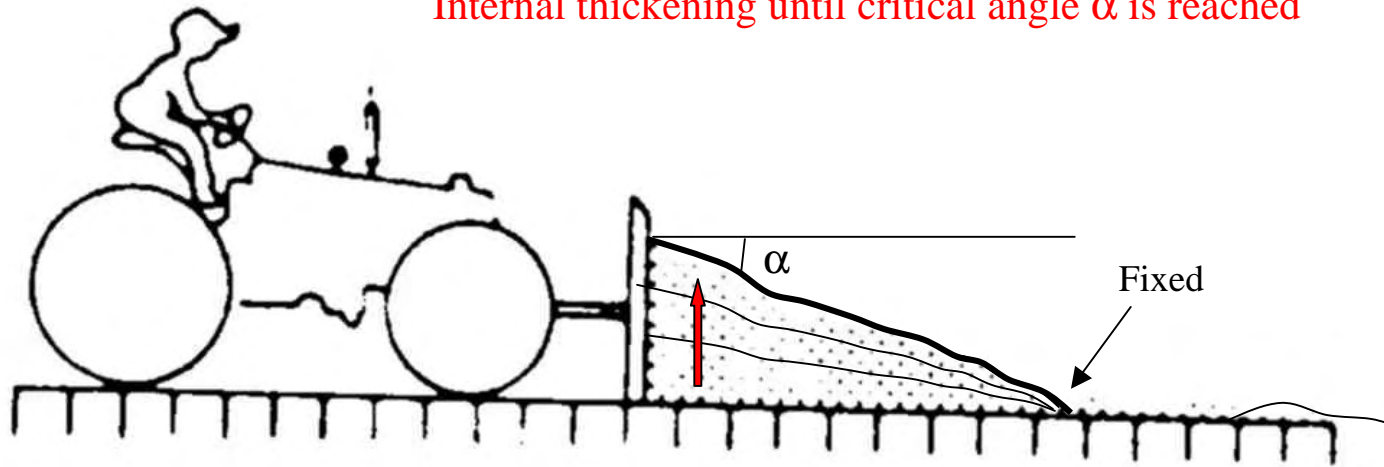
Line-drawing du profil Nankai 2



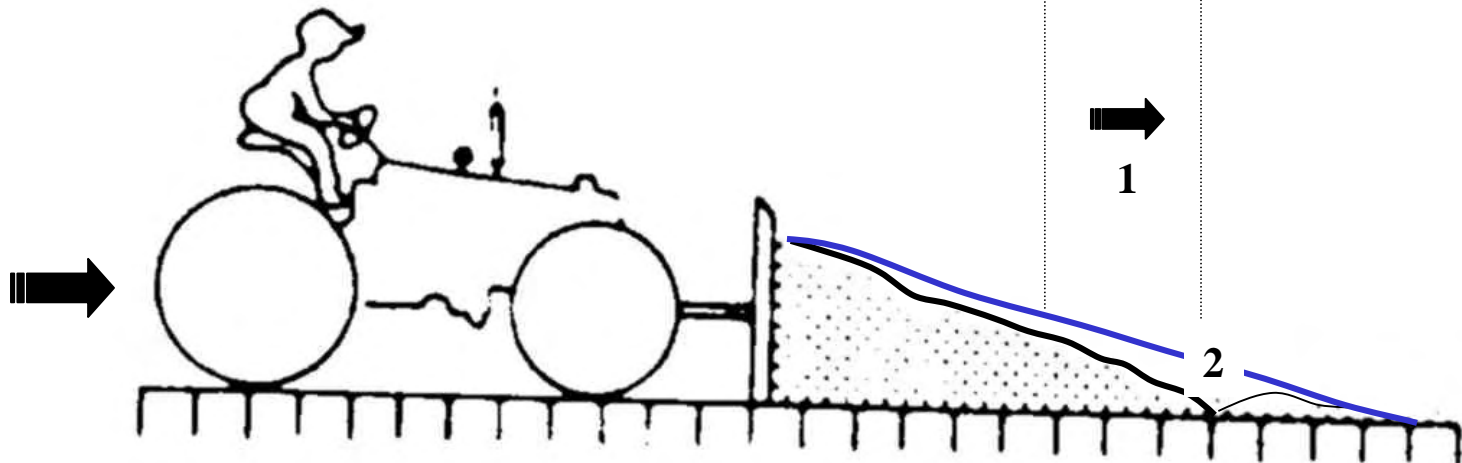
1 km



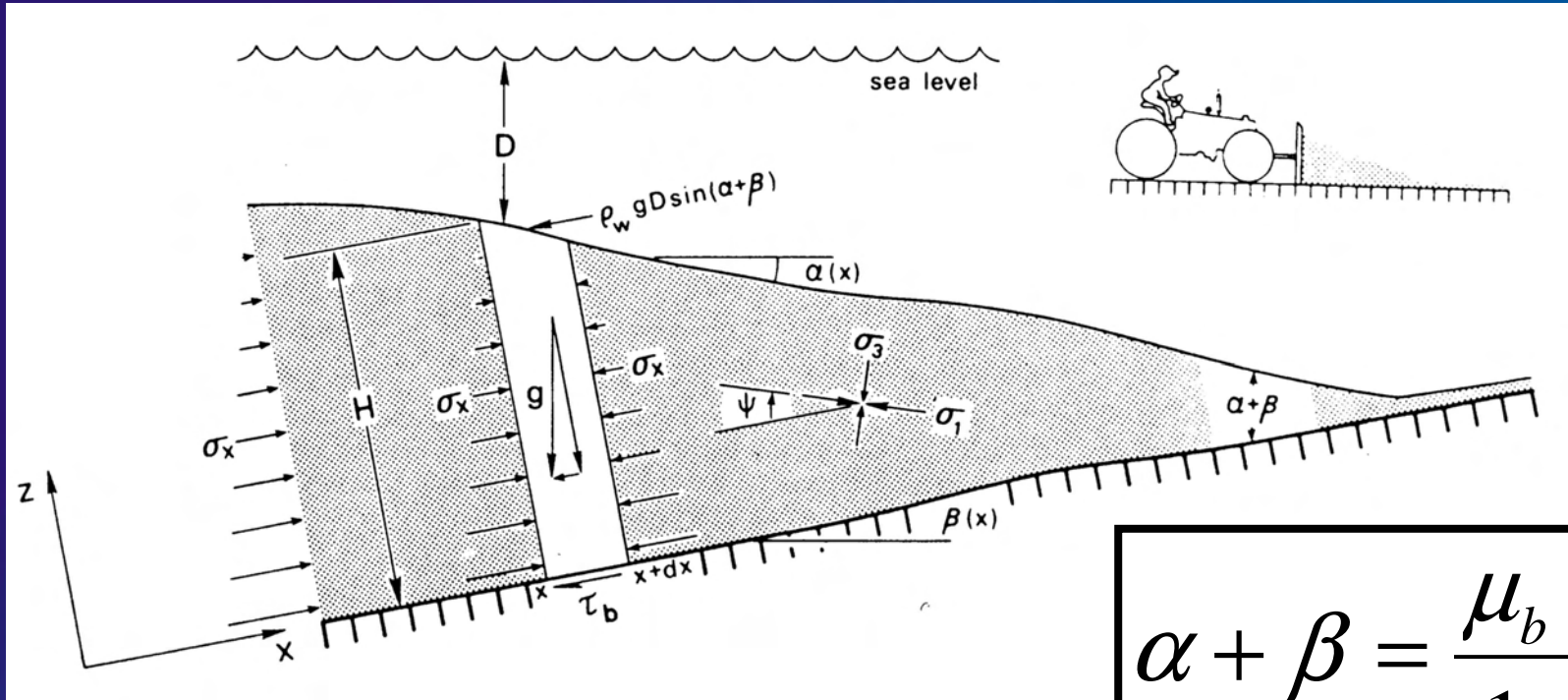
Internal thickening until critical angle α is reached



1. Basal sliding without internal thickening, then
2. New snow is incorporated in the wedge, α is lowered, then
3. The wedge will deform internally until α is reached again, and so on



Bilan des forces du prisme à l'équilibre



$$\alpha + \beta = \frac{\mu_b + \beta}{1 + K}$$

$$\rho g H \beta + \rho_w g D (\alpha + \beta) + \tau_b + \frac{d}{dx} \int_0^H \sigma_x dz = 0$$

Poids de la
colonne
sédimentaire
(pression
lithostatique)

Poids de la
colonne d'eau
(pression de
confinement)

Résistance
au
glissement
(friction
basale)

Somme des forces de
poussée agissant sur
les 2 côtés de la
colonne en x et x+dx

Conditions de fracturation et état critique

Dans le prisme

➔ **Critère de néorupture (Mohr-Coulomb)**

$$\tau_i = c_o + \mu_c \sigma_n$$

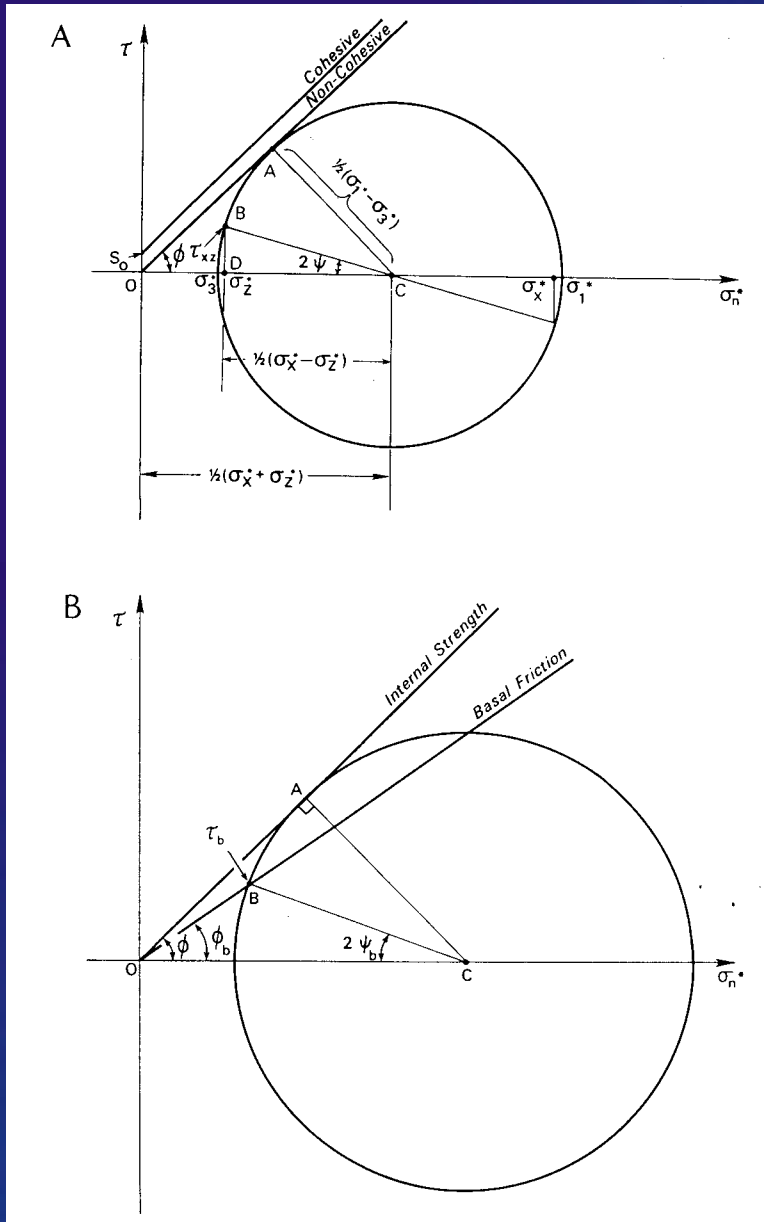
$$\tau_b = c_f + \mu_f \sigma_n$$

$$\text{avec } \mu_f < \mu_c$$

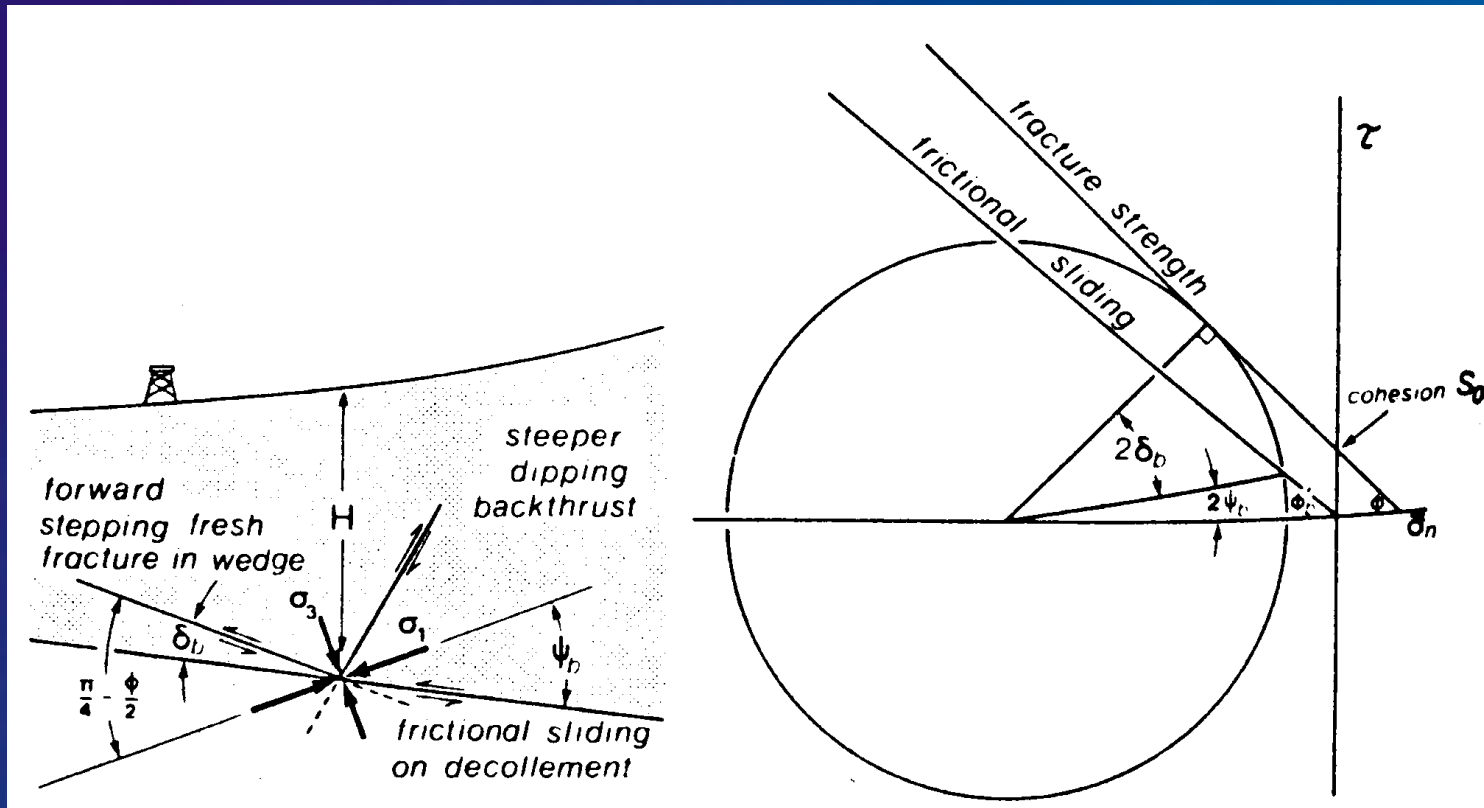
Le prisme est à l'état critique lorsque le cercle tangente la droite de néorupture

Base du prisme

➔ **Critère de friction**

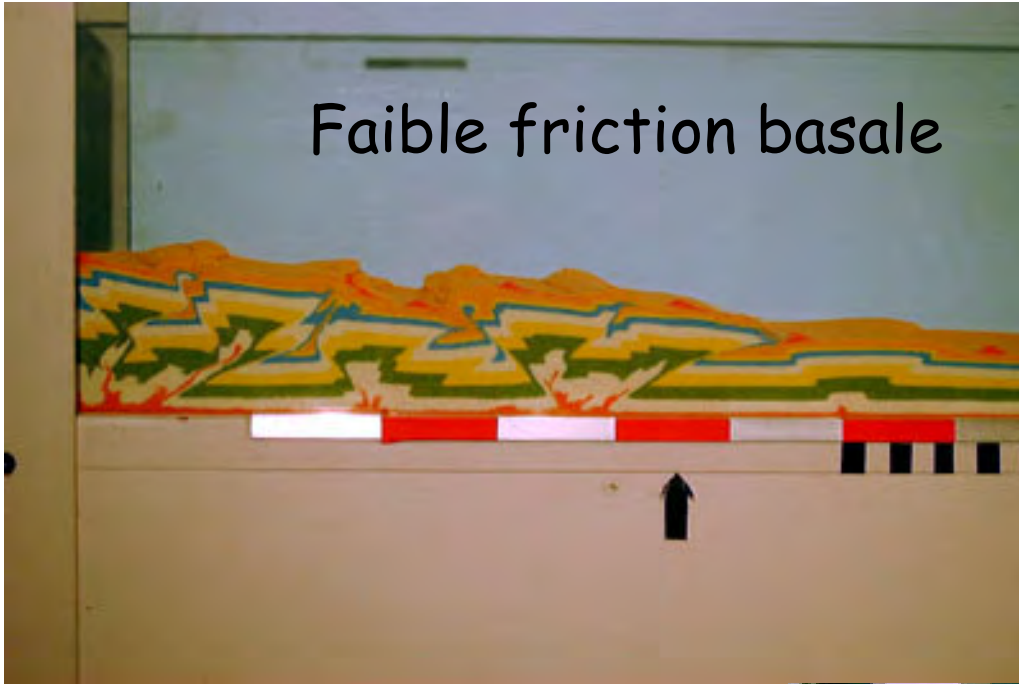


Géométrie des systèmes de failles



L'inclinaison des systèmes de failles
conjuguées / au décollement basal
est fonction de la friction interne et
basale

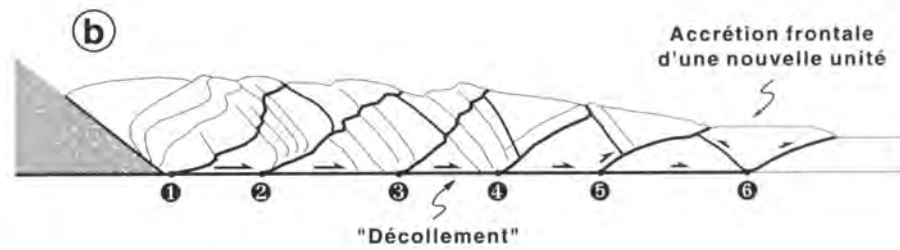
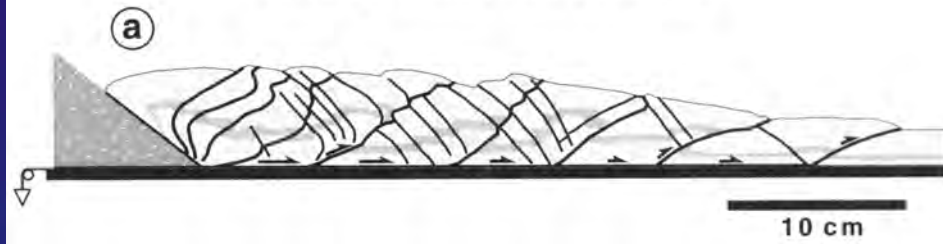
Faible friction basale



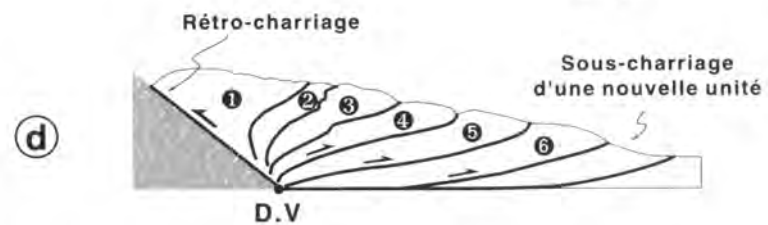
Forte friction basale



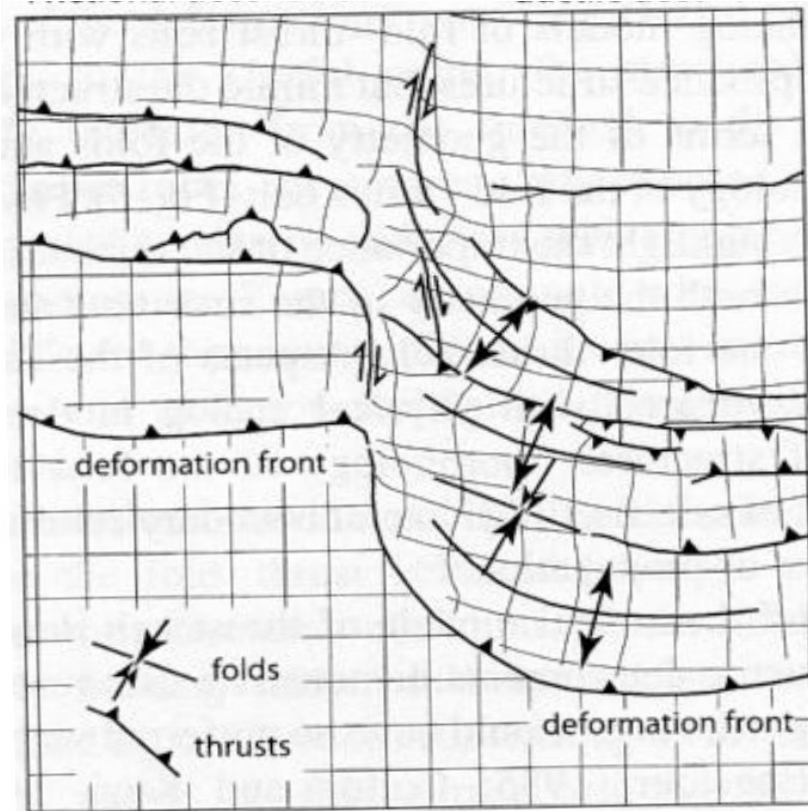
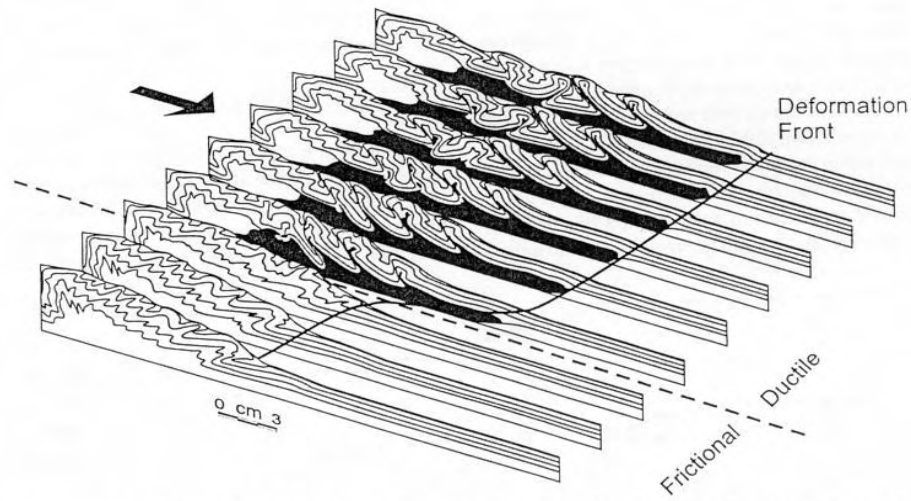
FAIBLE FRICTION BASALE



FORTE FRICTION BASALE



Frictional decollement Ductile decollement



(Cotton and Koyi, 2000)

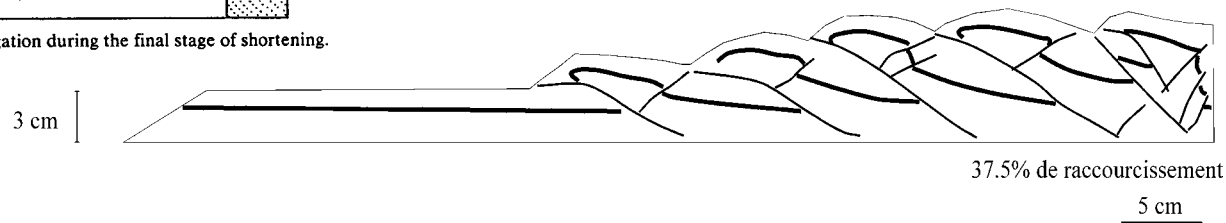
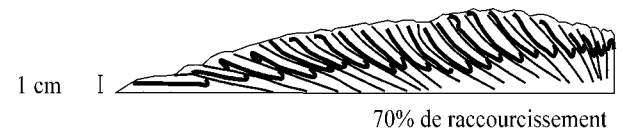
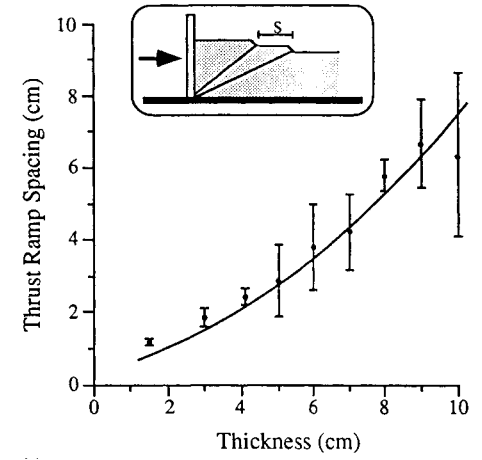
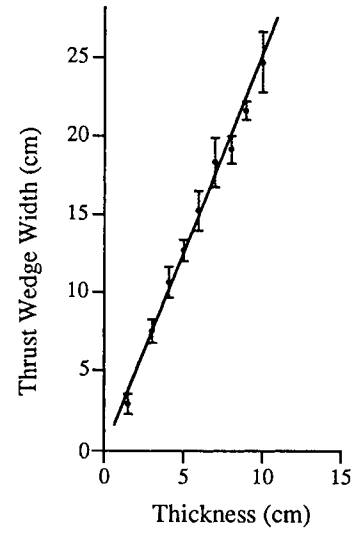
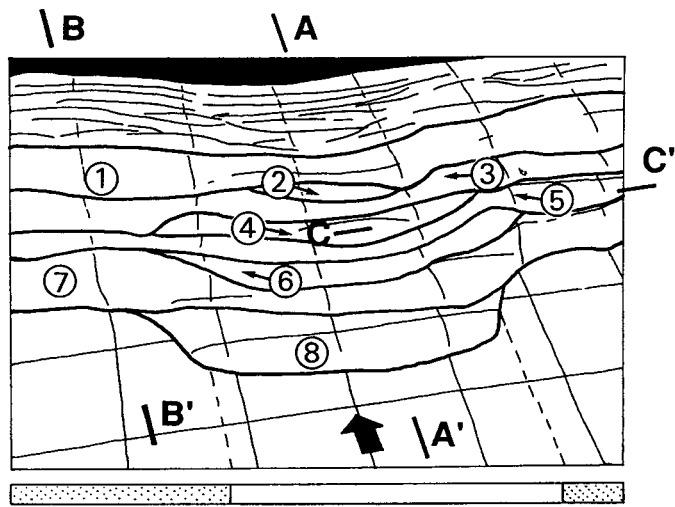
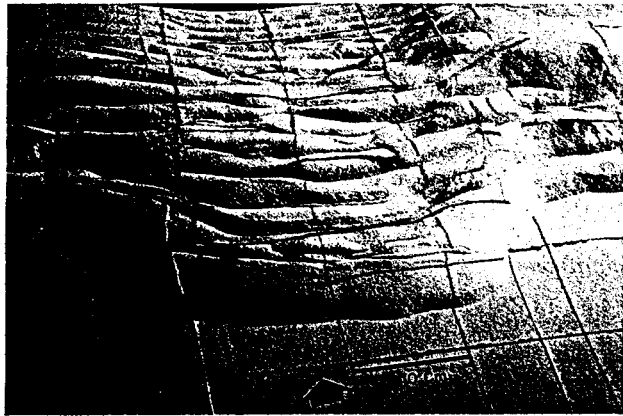
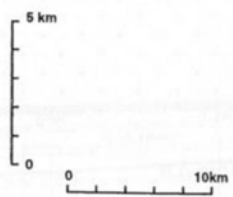
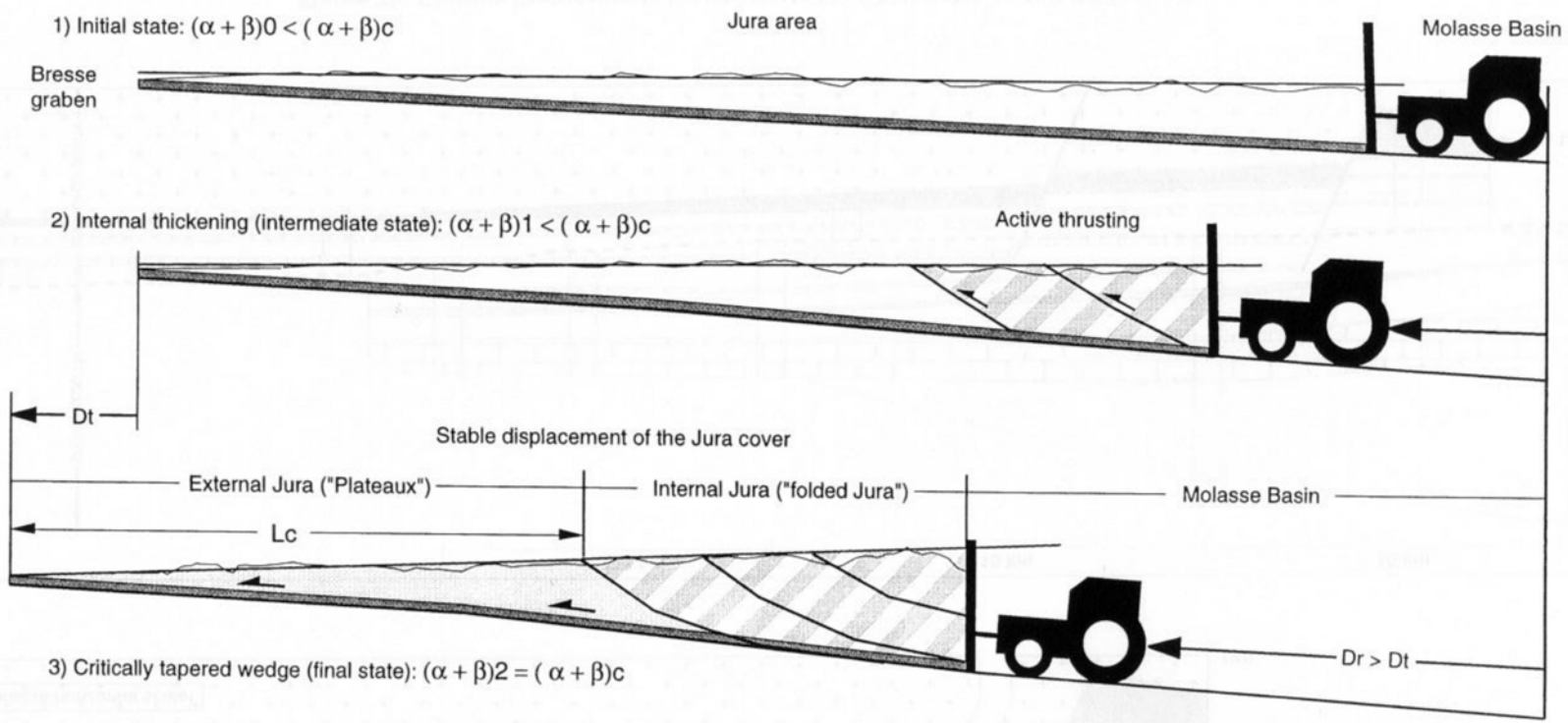


Fig. 12. The kinematics of thrust propagation during the final stage of shortening.



$(\alpha + \beta)c$ = critical taper required to enable the steady displacement of the wedge
 Lc = equivalent maximum length of Hubbert-Rubey rigid body transferrable without internal deformation

- non transferable wedge
- folded and thrust internal wedge
- steady external wedge
- basal massive salt

(Philippe, 1995)

Most authors consider the formation of the thin-skinned Jura fold-and-thrust belt as a rather short-lived event.

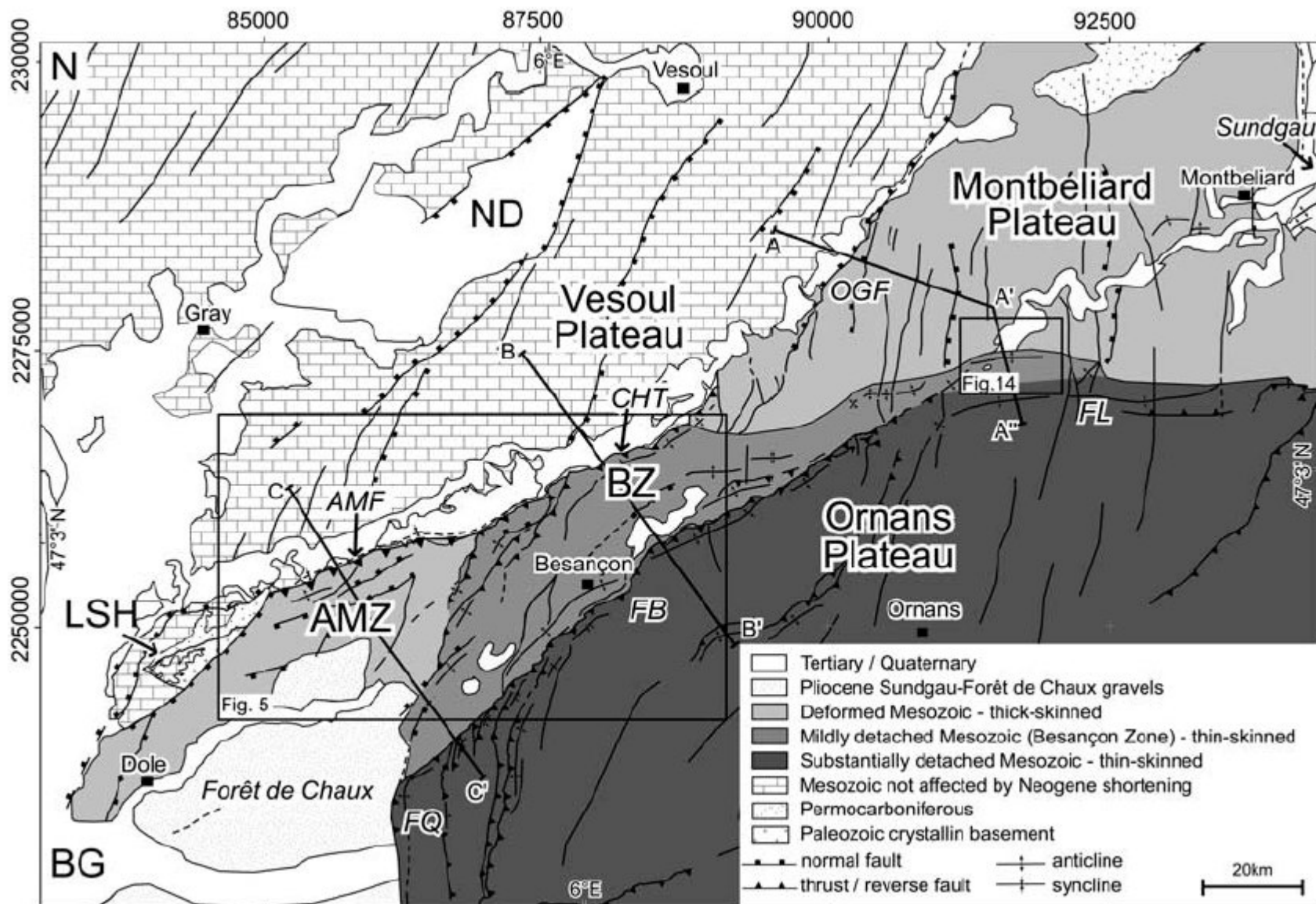
Near its northern rim a maximum age for the onset of thin-skinned deformation is inferred from the Bois de Raube formation, which reveals a biostratigraphic age between 13.8 and 10.5 Ma years and whose sedimentation predates thin-skinned Jura folding in that area [Kälin, 1997]. A maximum age of 9 Ma can be inferred from the western front of the Jura where this fold-and-thrust belt thrusts the Bresse Graben [Guellec et al., 1990; Becker, 2000].

Termination of thin-skinned Jura folding is less well constrained. Undeformed karst sediments have been detected in a fold limb located in the central part of the fold-and-thrust belt; their biostratigraphic age implies that folding terminated before some 4.2-3.2 Ma ago in this area [Bolliger et al., 1993; Steininger et al., 1996]. In the case that propagation of the fold-and-thrust belt toward the foreland was in sequence, thin-skinned deformation may have operated longer in the more external parts of the fold-and-thrust belt [Ustaszewski and Schmid, 2006].

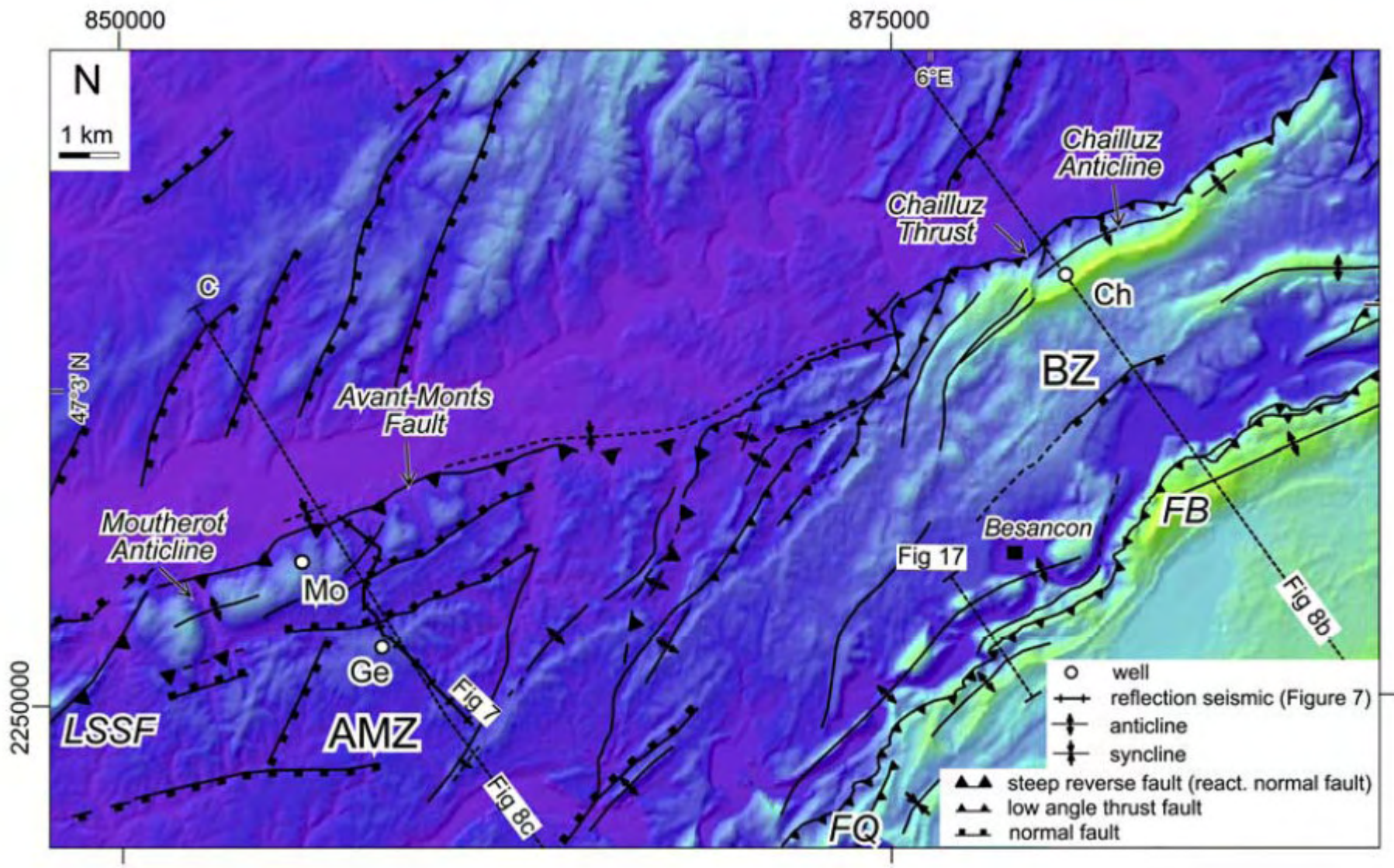
Evidence for ongoing deformation from the northern and northwestern front of the fold-and-thrust-belt is indeed provided by studies in tectonic geomorphology [Dreyfuss and Glangeaud, 1950; Campy, 1984; Meyer et al., 1994; Nivière and Winter, 2000; Giamboni et al., 2004; Madritsch, 2008]. The style of post-early Pliocene and recent deformation, however, is a matter of debate ...

**... mais avec une implication tardive du socle
dans la déformation**

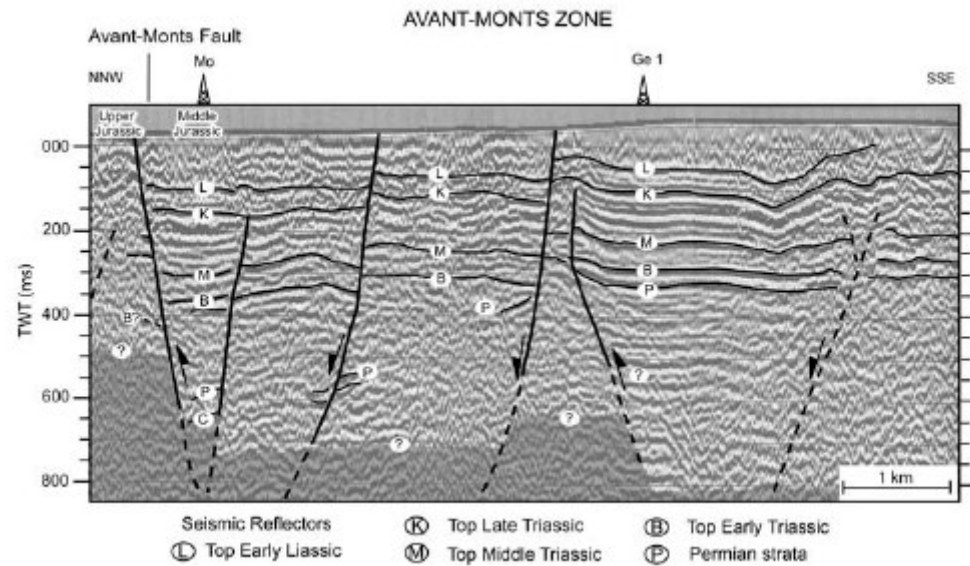
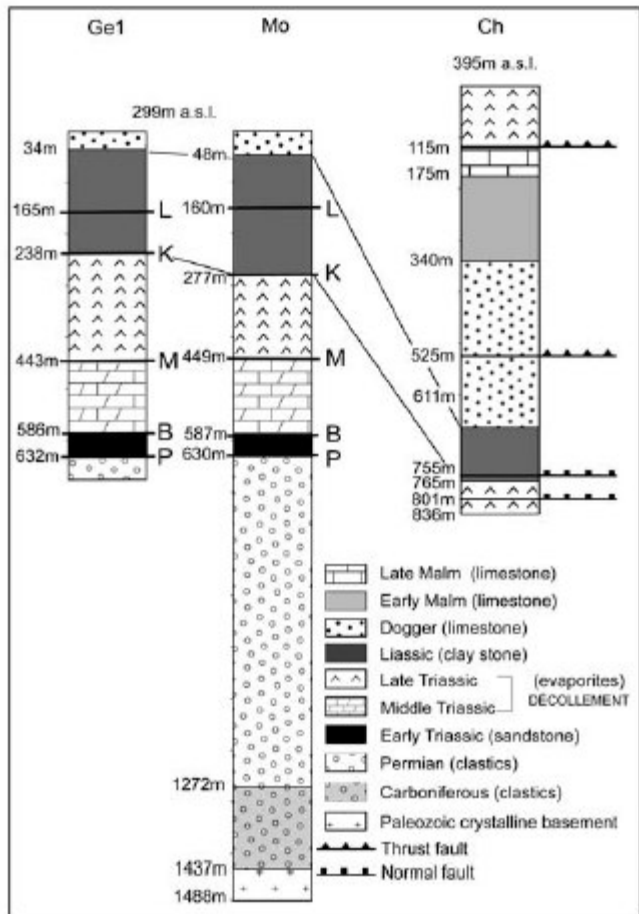
dans le NW du Jura, ...



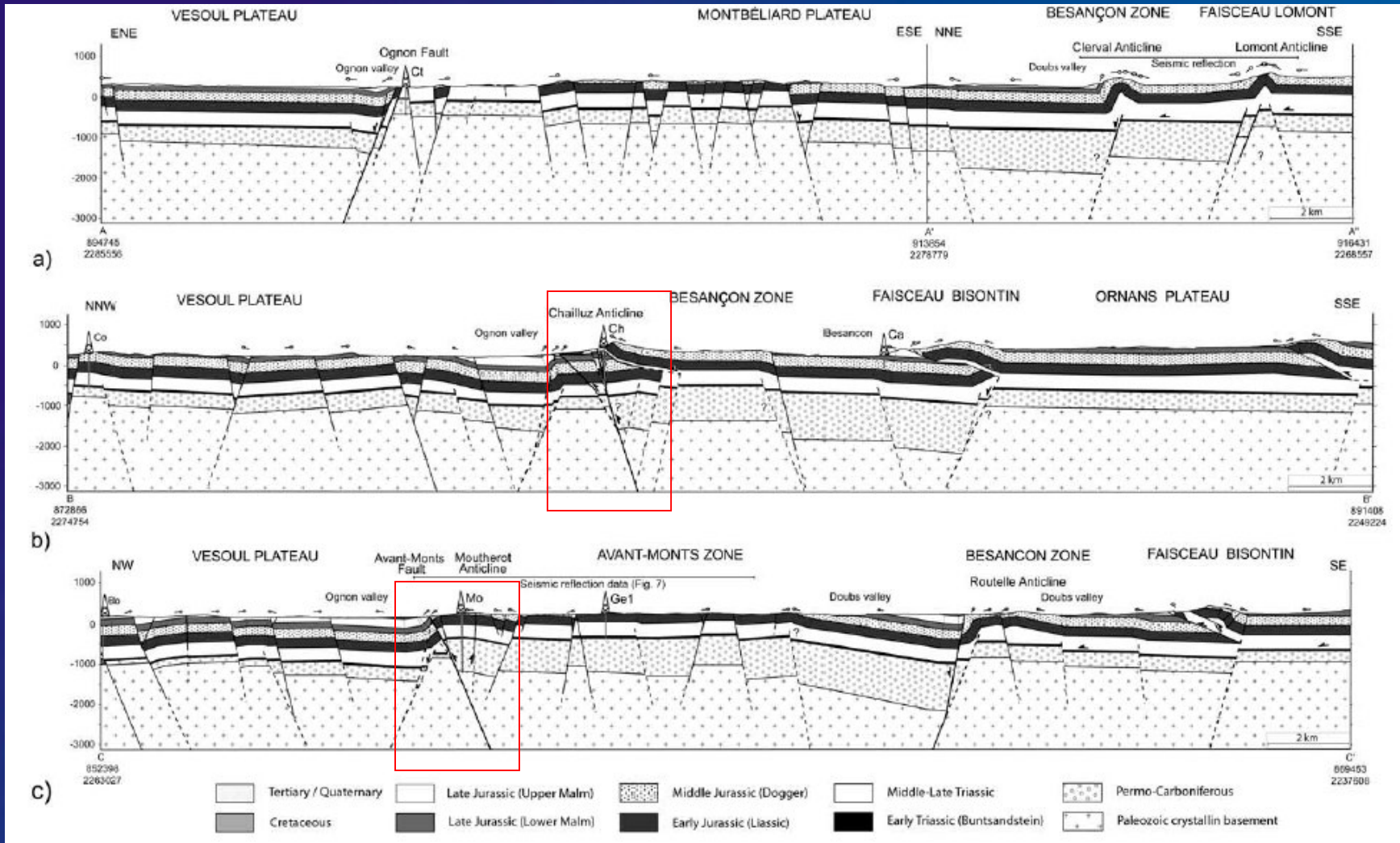
(Madritsch, thèse, 2008)



(Madritsch, thèse, 2008)

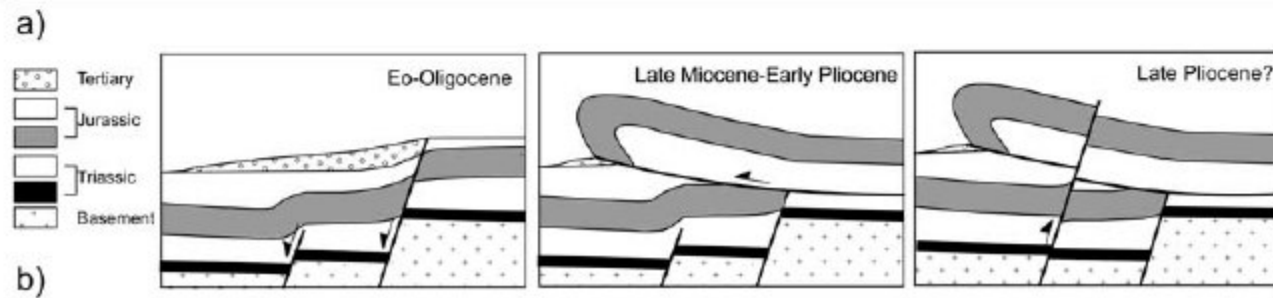
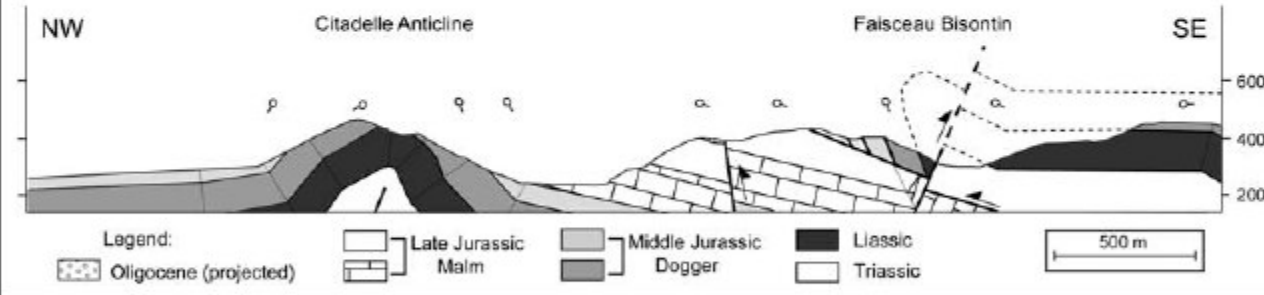
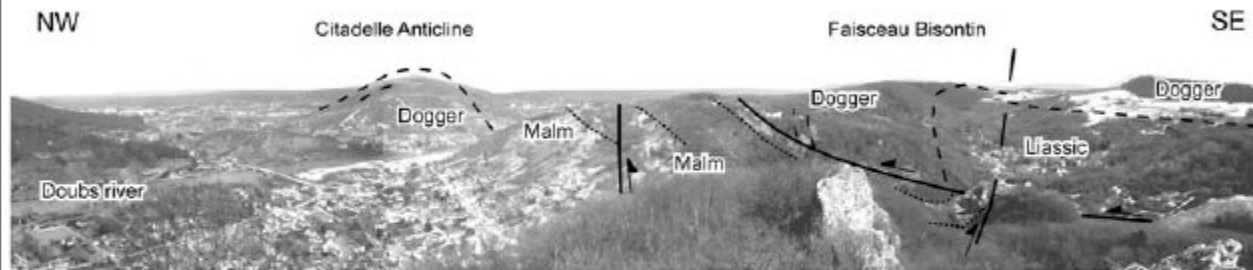


(Madritsch, thèse, 2008)

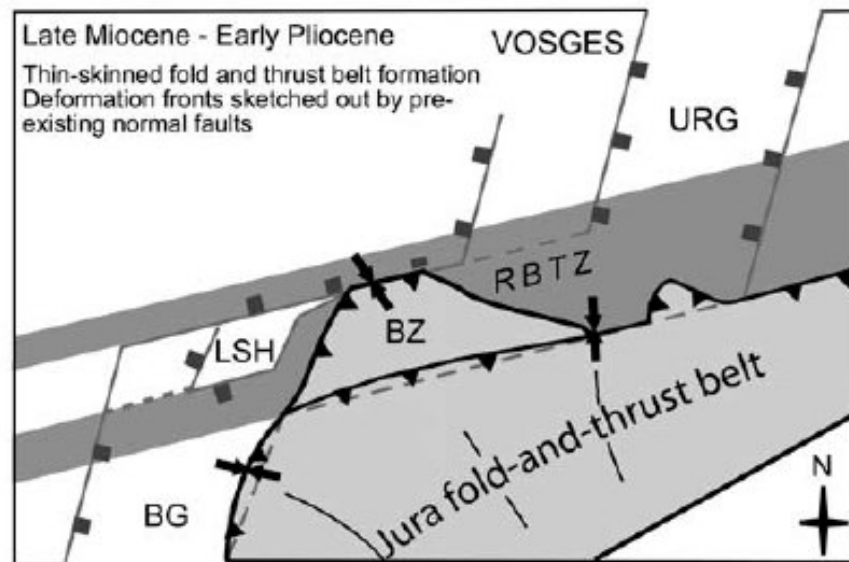


(Madritsch, thèse, 2008)

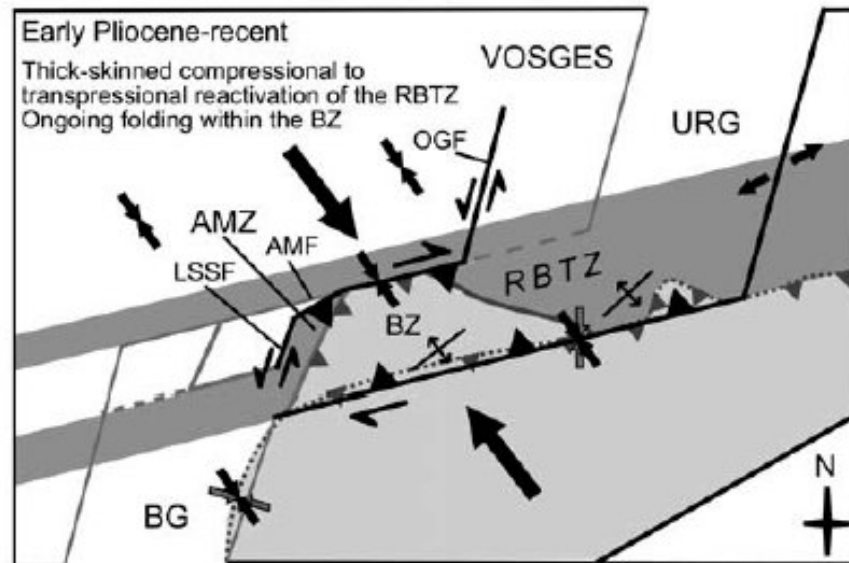




(Madritsch, thèse, 2008)



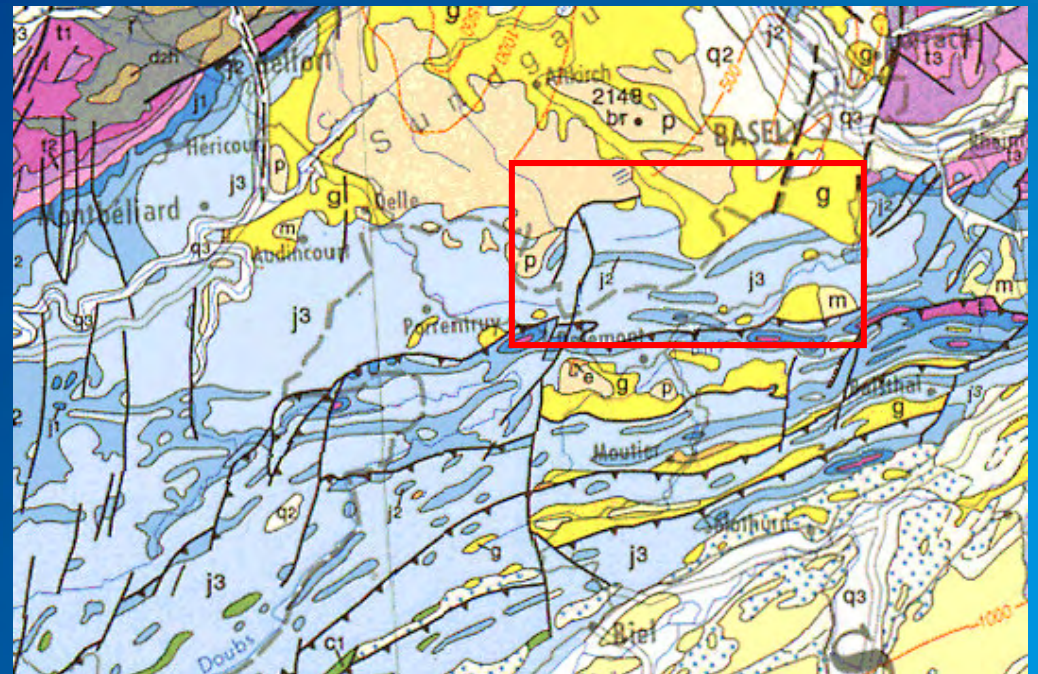
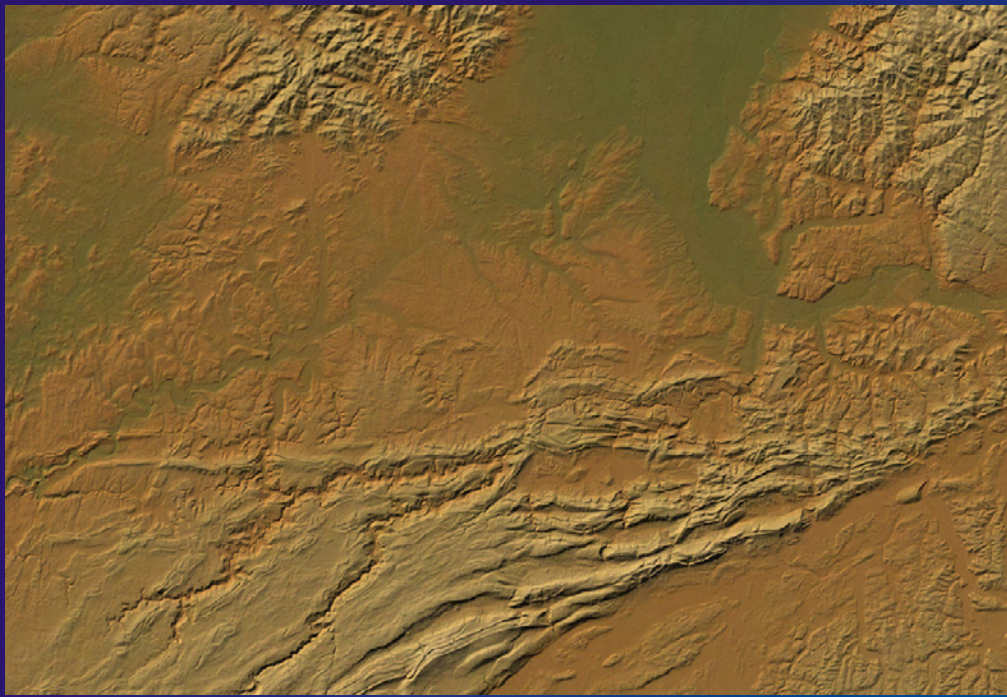
a)

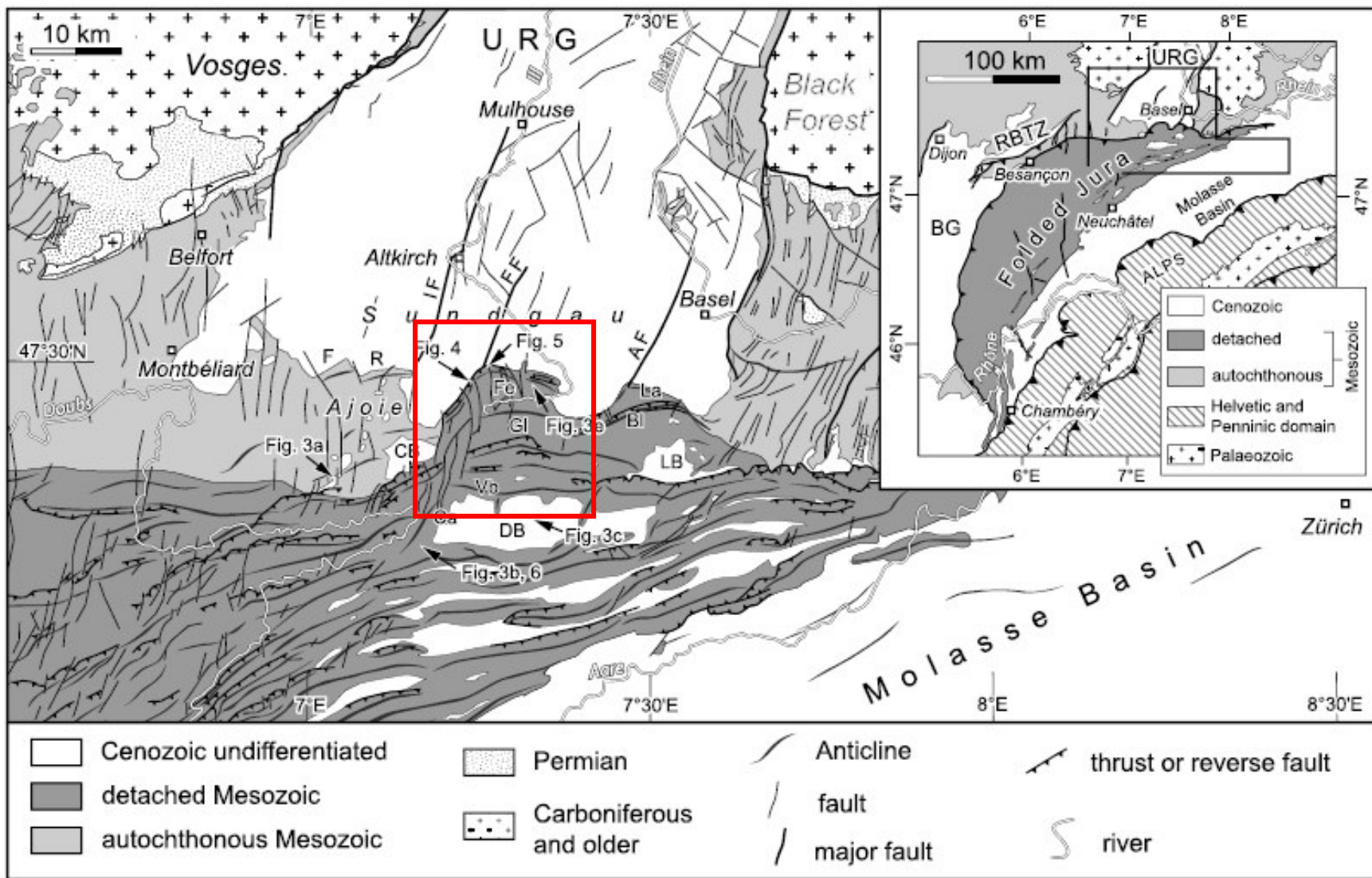


b)

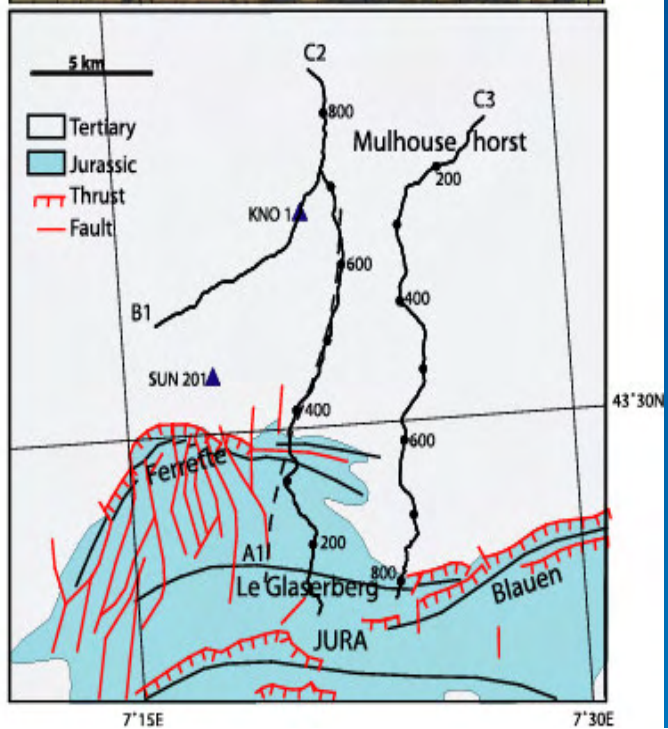
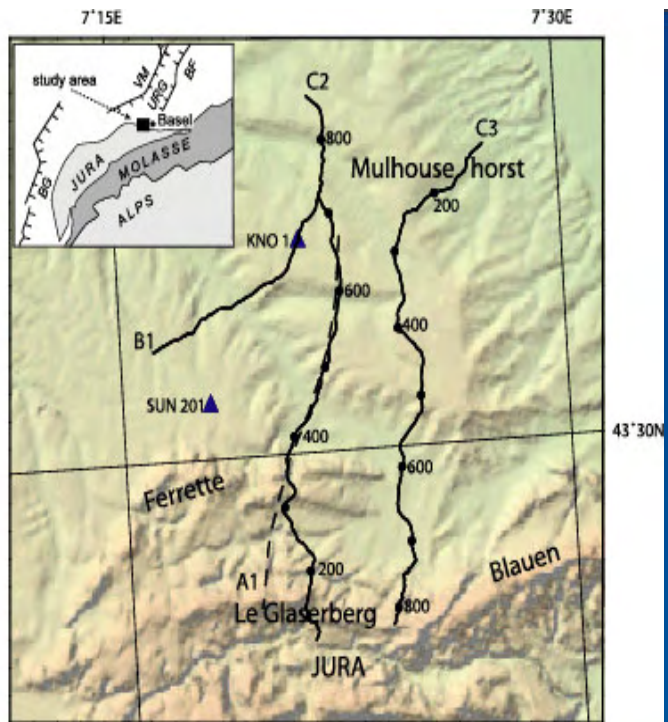
(Madritsch, thèse, 2008)

dans le N du Jura...





(Ustaszewski et Schmid, 2006)



(Rotstein and Schaming, 2004)

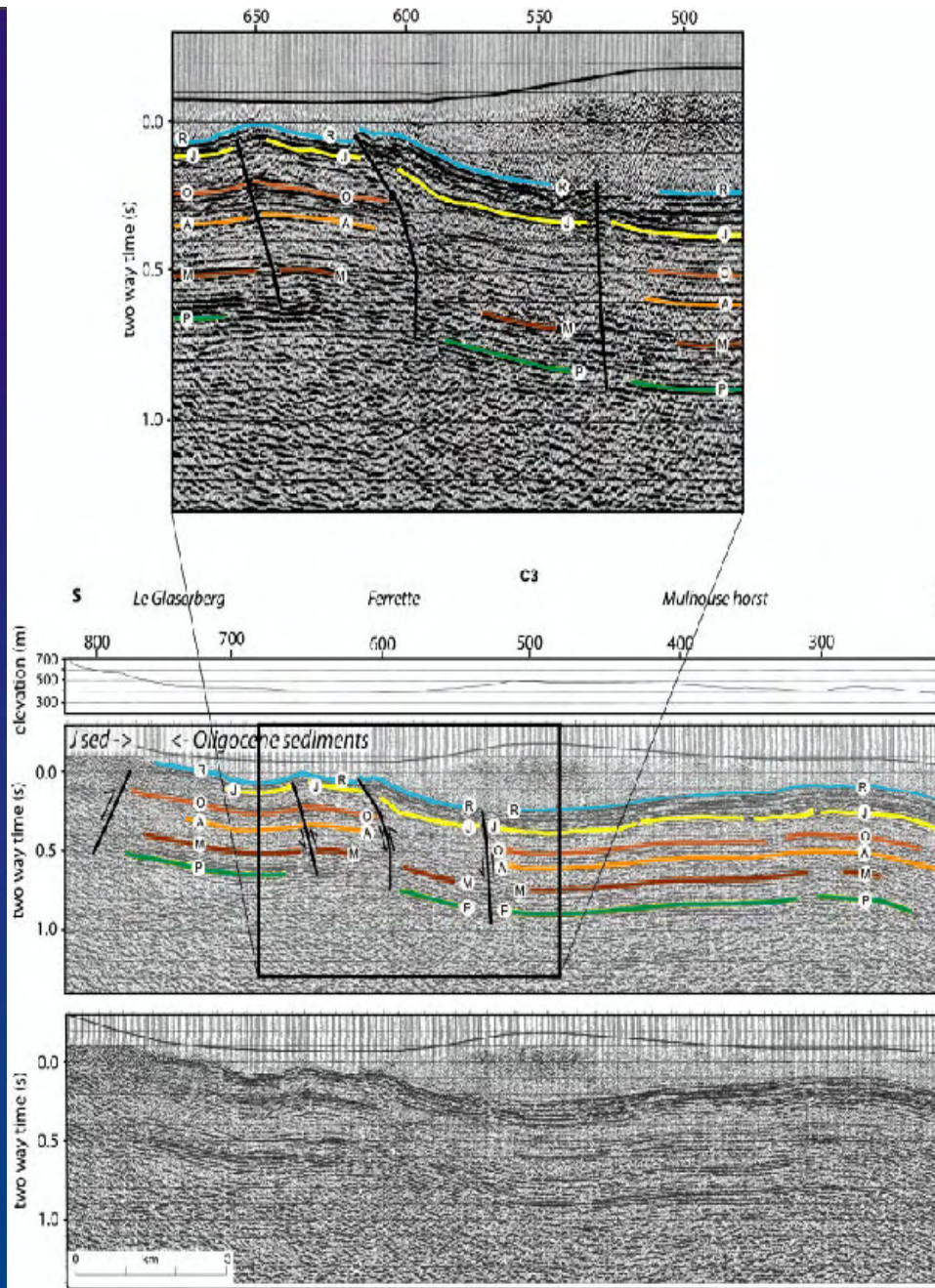


Fig. 3 U ninterpreted and interpreted part of migrated section C3. P, Top Permian; M, Muschelkalk (Triassic); A, Top Aalenian (Jurassic); O, Grande Oolithe (Jurassic); J, Top Jurassic; R, Rupelian. Zero reference is at 350 m above sea-level. Also shown are (1) the ages of the near-surface sediments that suggest thrusting, (2) the surface elevations, (3) the locations of the Ferrette and Le Glaserberg Jura anticlines, and (4) an enlargement of the main faulted area. For location, see Fig. 1.

(Rotstein and Schaming, 2004)

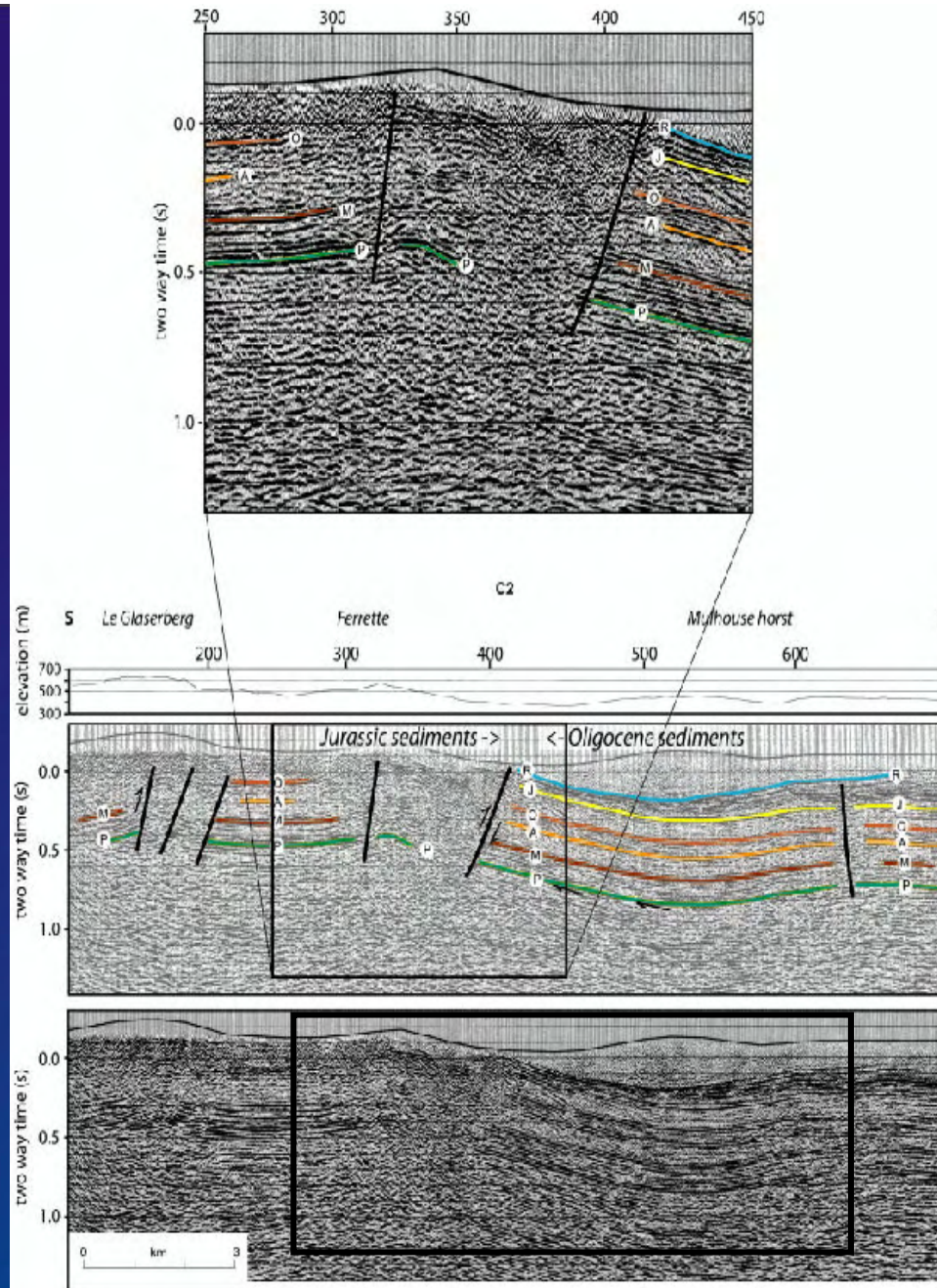
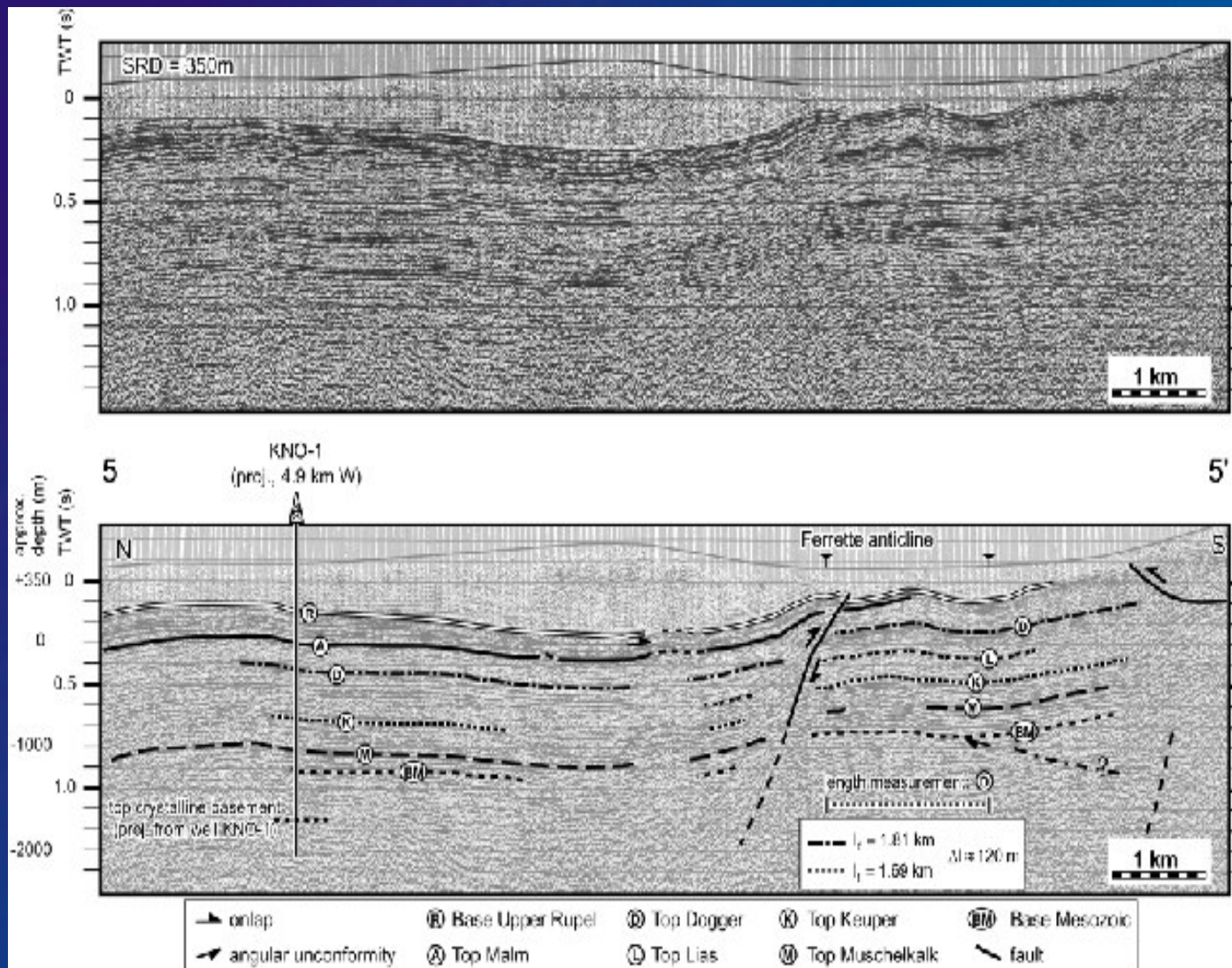
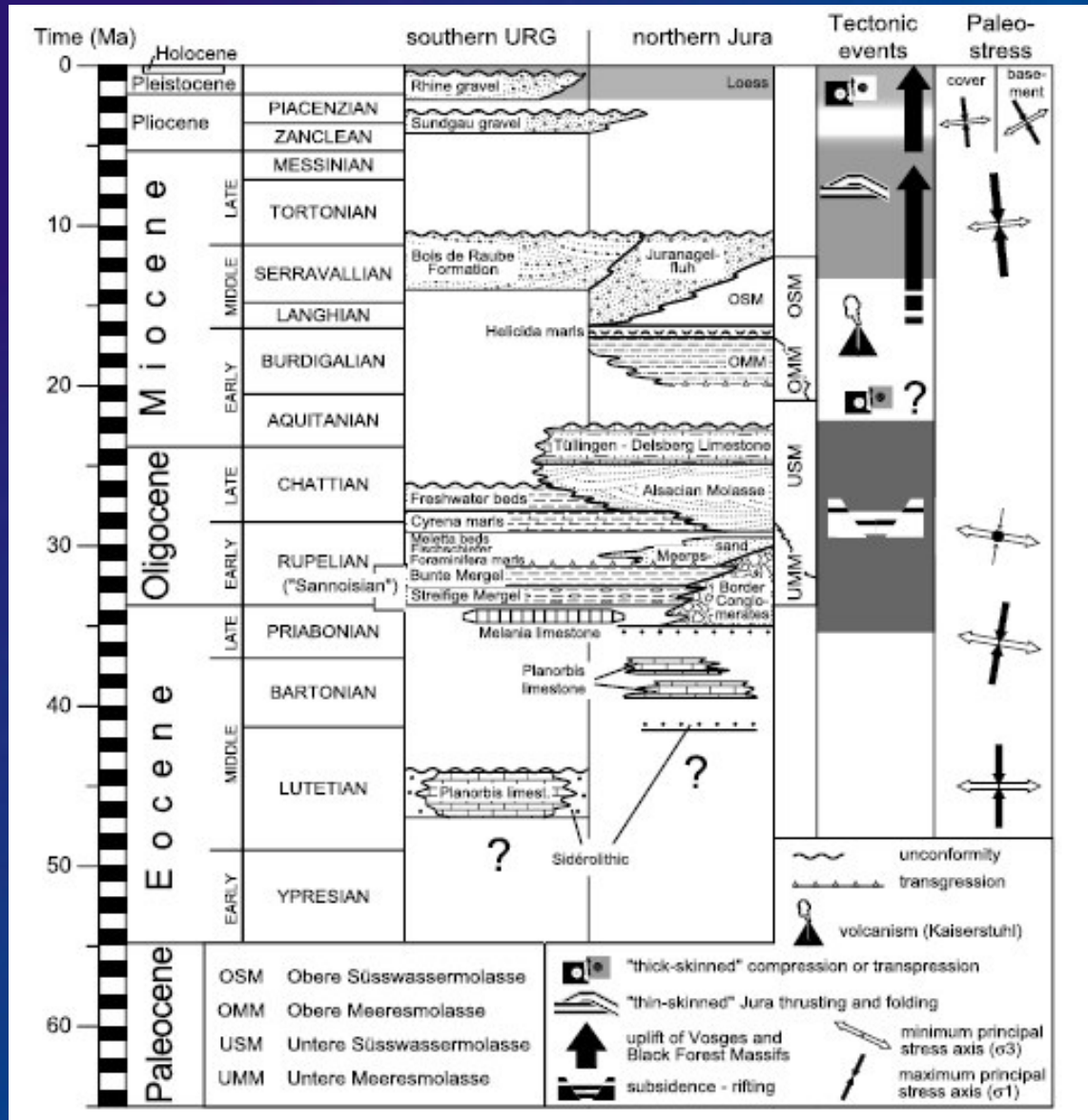


Fig. 2 Uninterpreted and interpreted part of migrated seismic section C2. P, Top Permian; M, Muschelkalk (Triassic); A, Top Aalenian (Jurassic); O, Grande Oolithe (Jurassic); J, Top Jurassic; R, Rupelian. Zero reference is at 350 m above sea-level. Also shown are (1) the ages of the near-surface sediments that suggest thrusting, (2) the surface elevations, (3) the locations of the Ferrette and Le Glaserberg Jura anticlines, and (4) an enlargement of the main faulted area. For location, see Fig. 1.

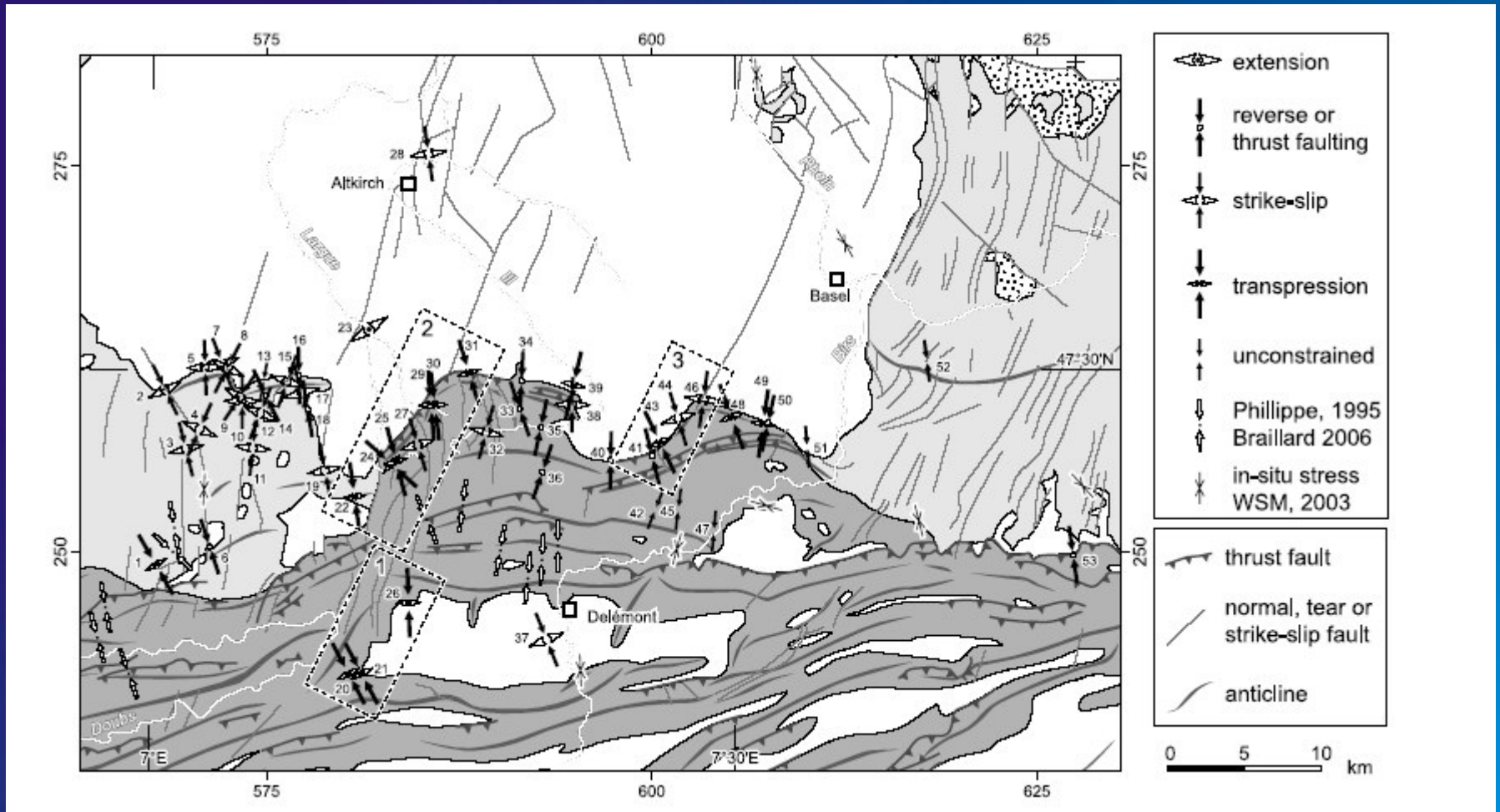
(Rotstein and Schaming, 2004)



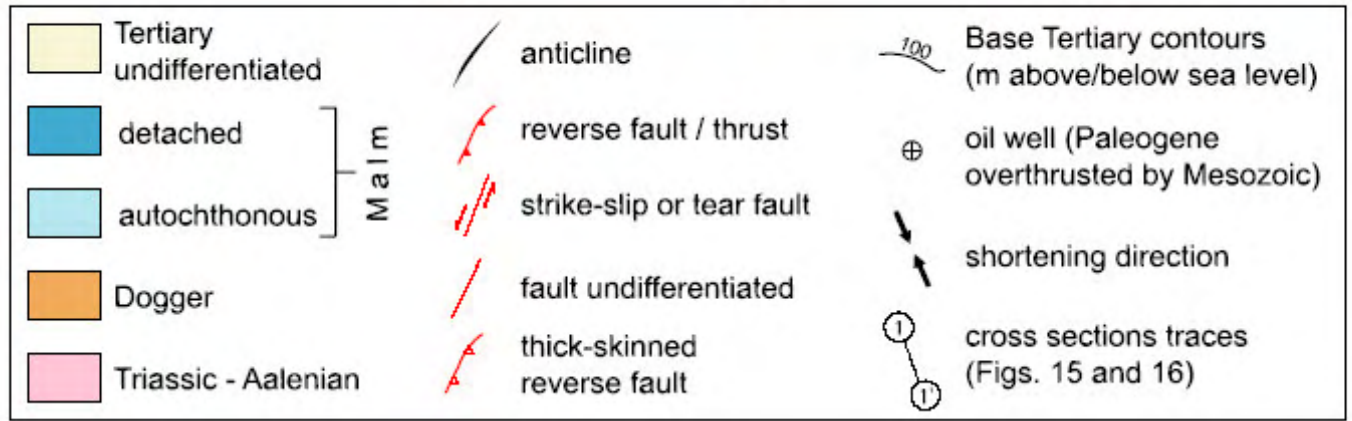
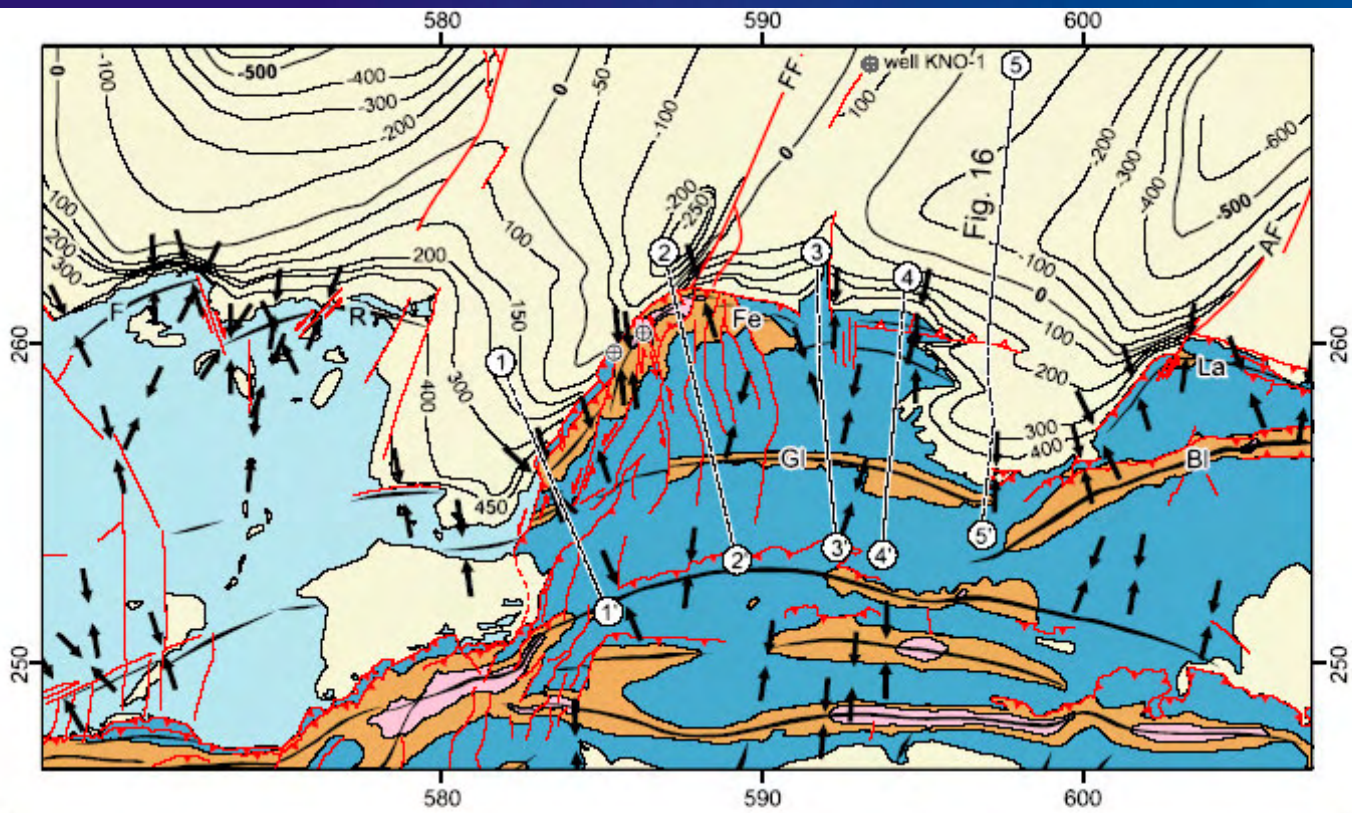
(Ustaszewski et Schmid, 2006)



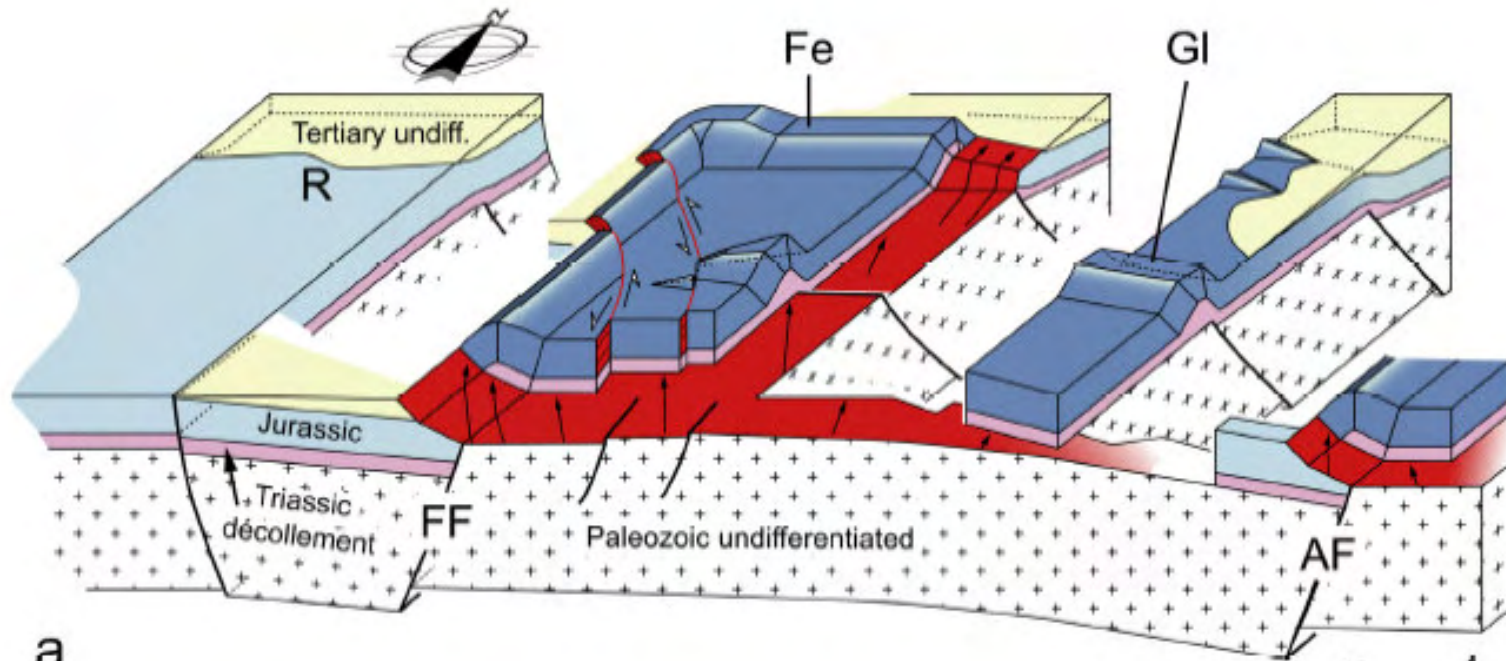
(Ustaszewski et Schmid, 2006)



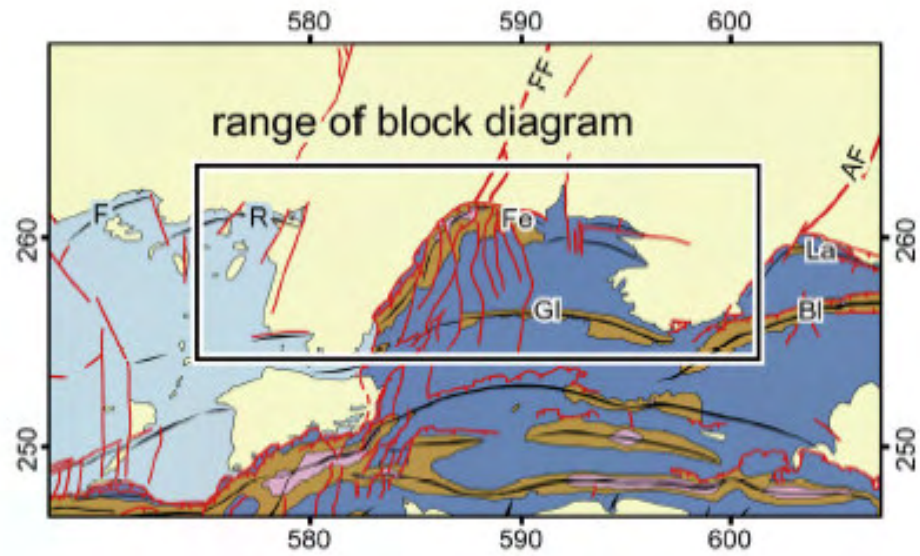
(Ustaszewski et Schmid, 2006)



(Ustaszewski et Schmid, 2006)



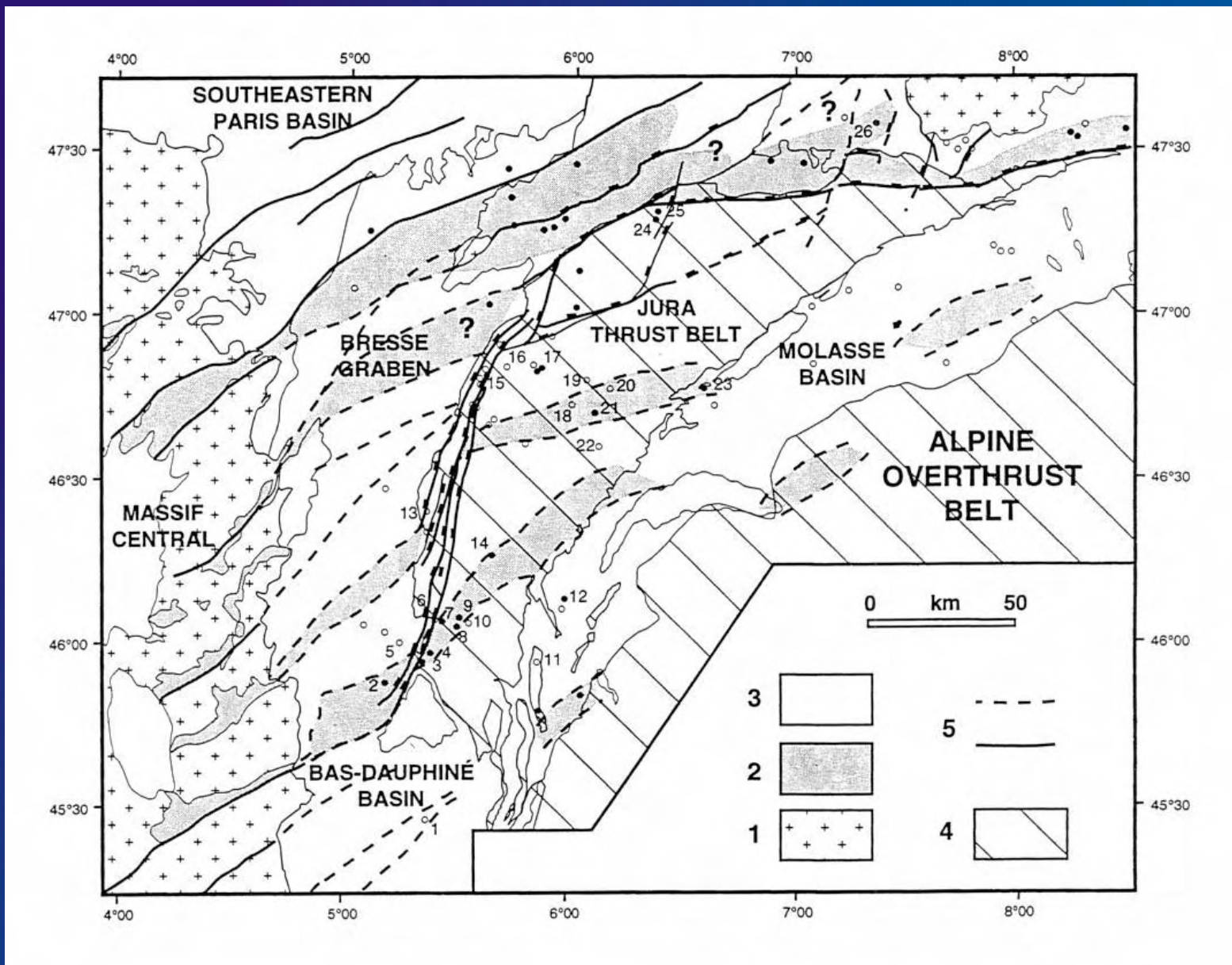
a



b

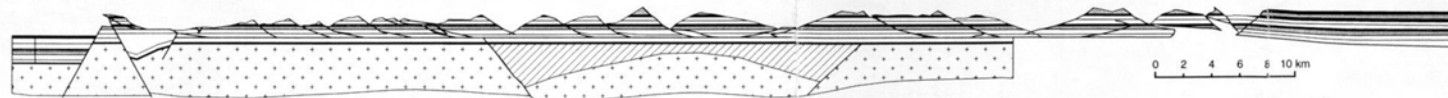
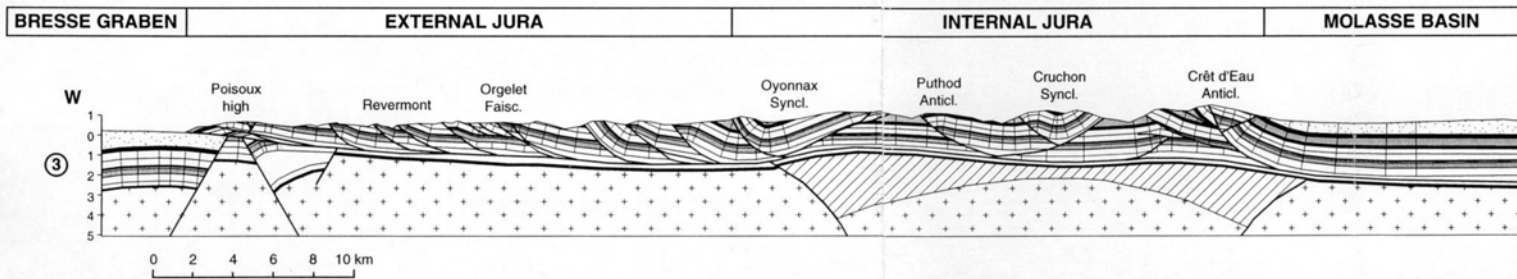
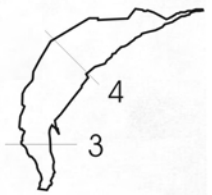
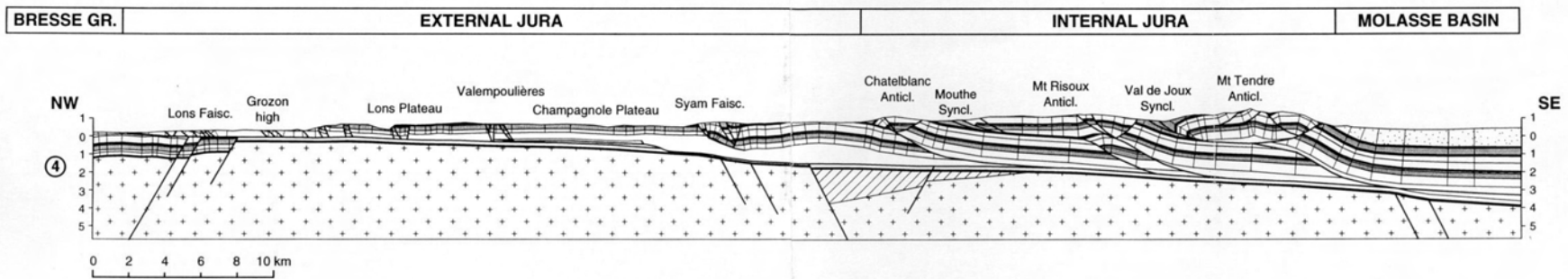
(Ustaszewski et Schmid, 2006)

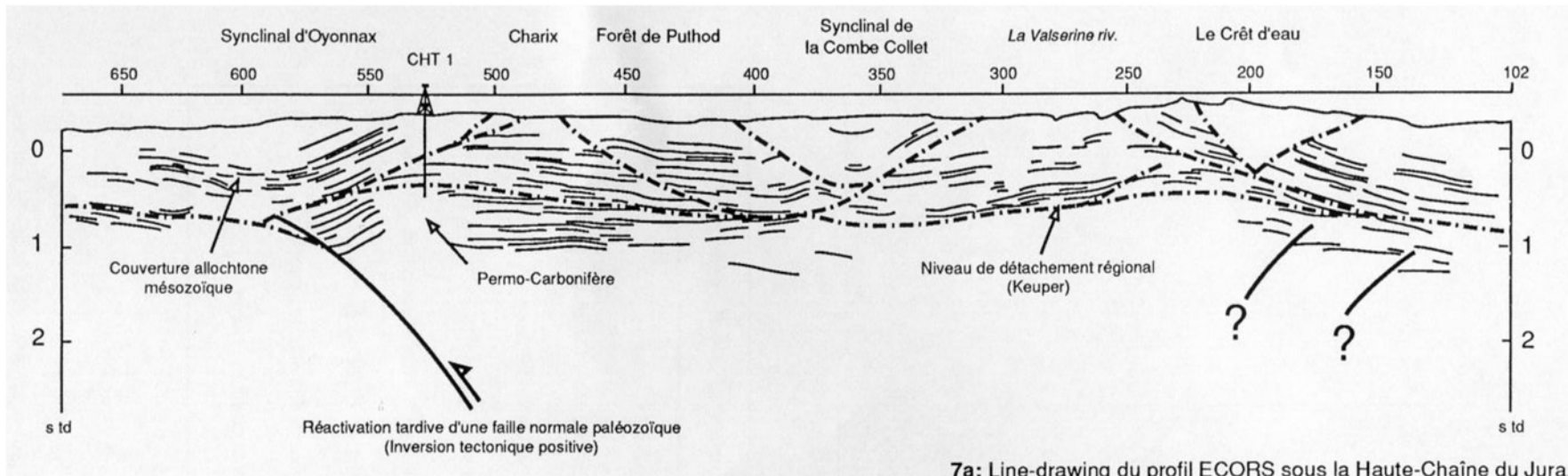
**et plus généralement (mais pas seulement)
dans le Jura interne...**



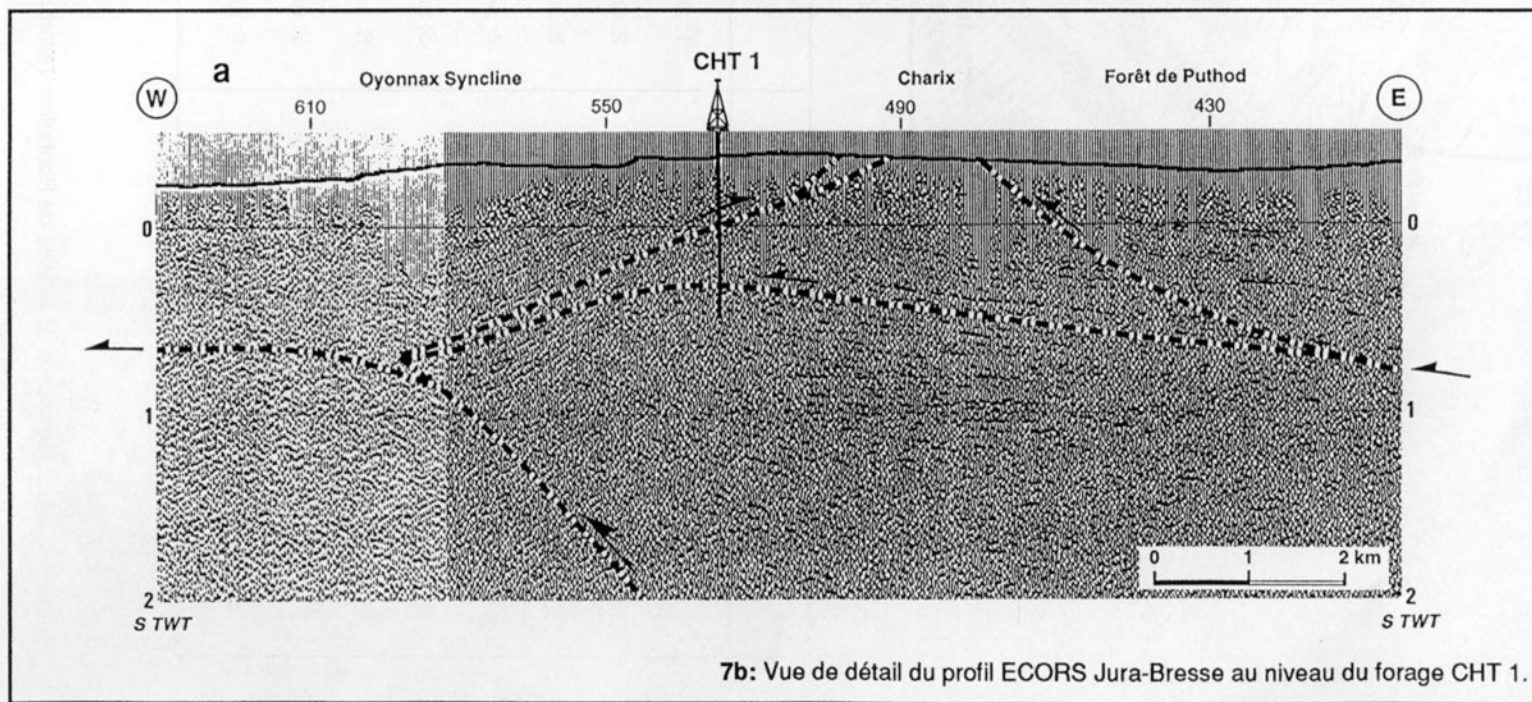
(BRGM, 1980; Truffert et al., 1990)

(Philippe, 1995)

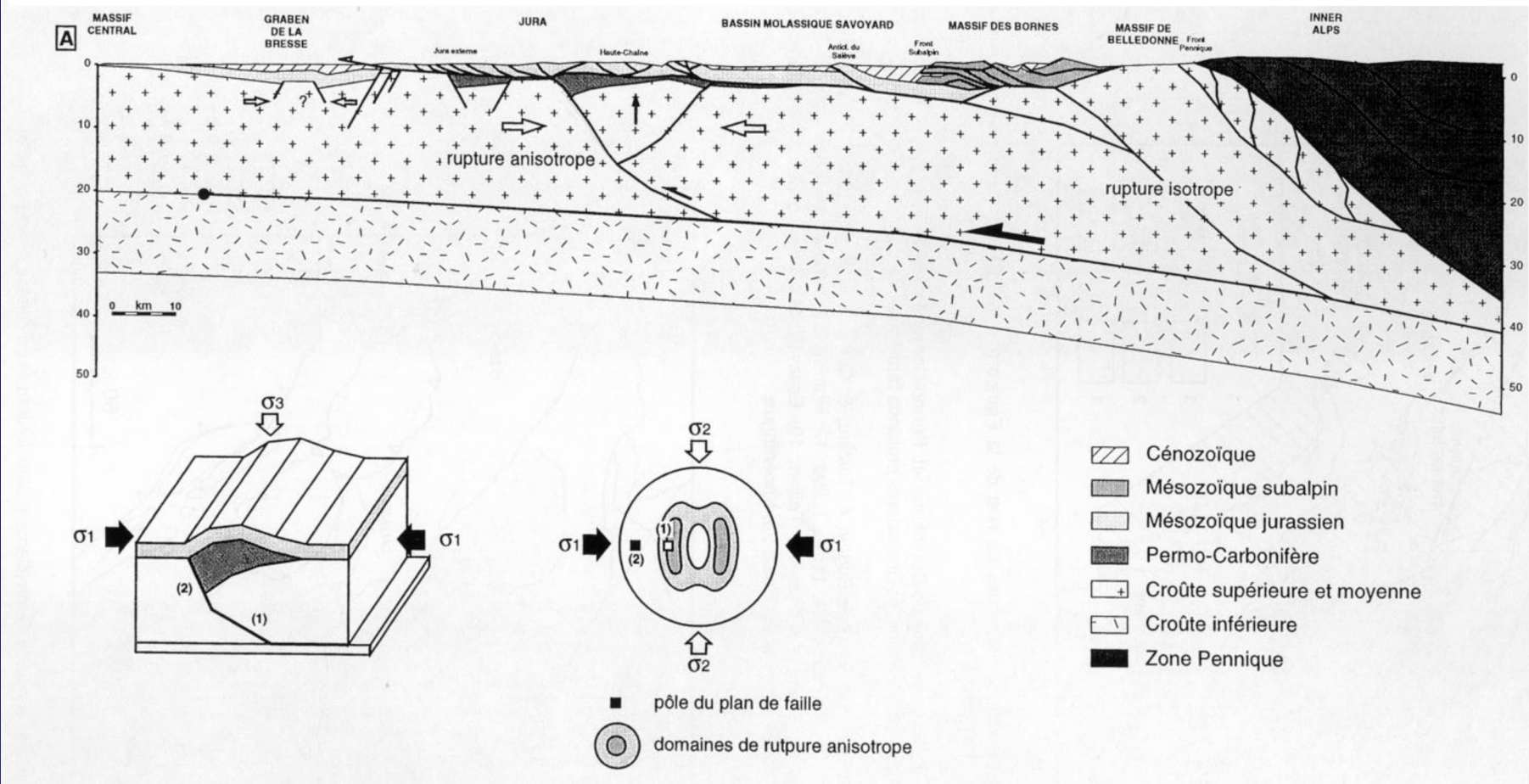




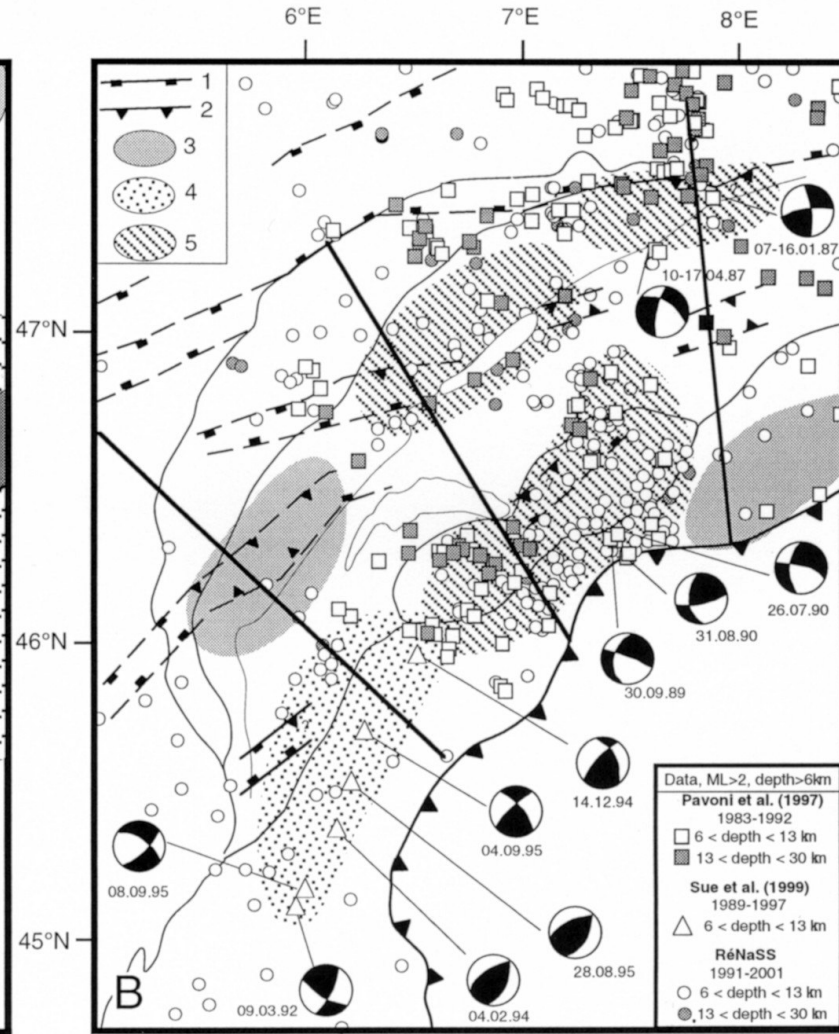
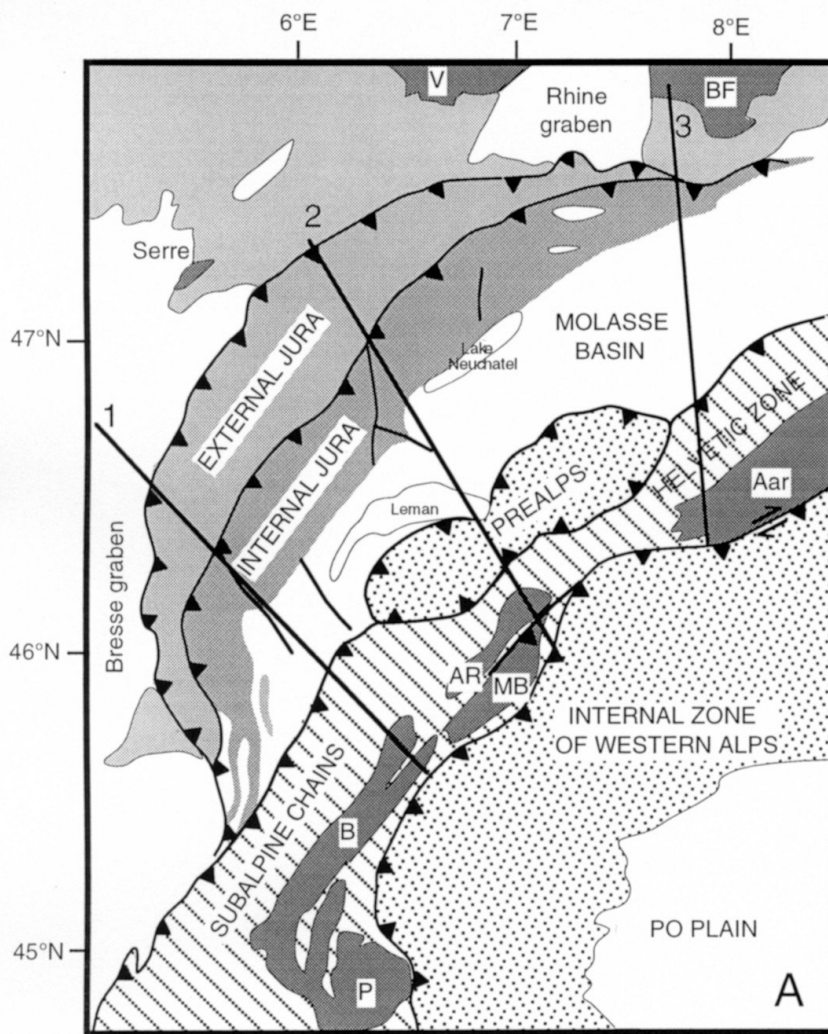
7a: Line-drawing du profil ECORS sous la Haute-Chaîne du Jura



7b: Vue de détail du profil ECORS Jura-Bresse au niveau du forage CHT 1.



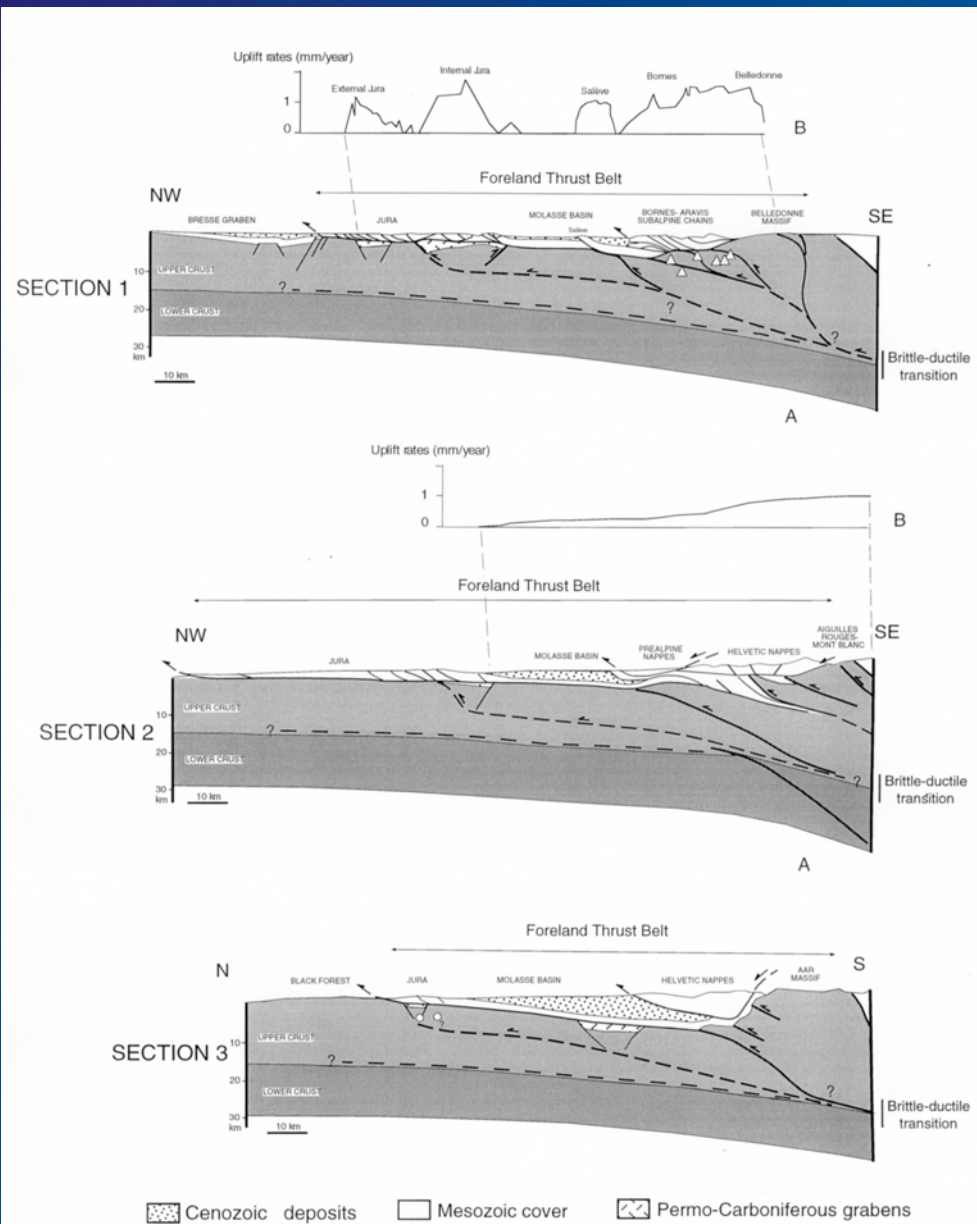
(Philippe, 1995)



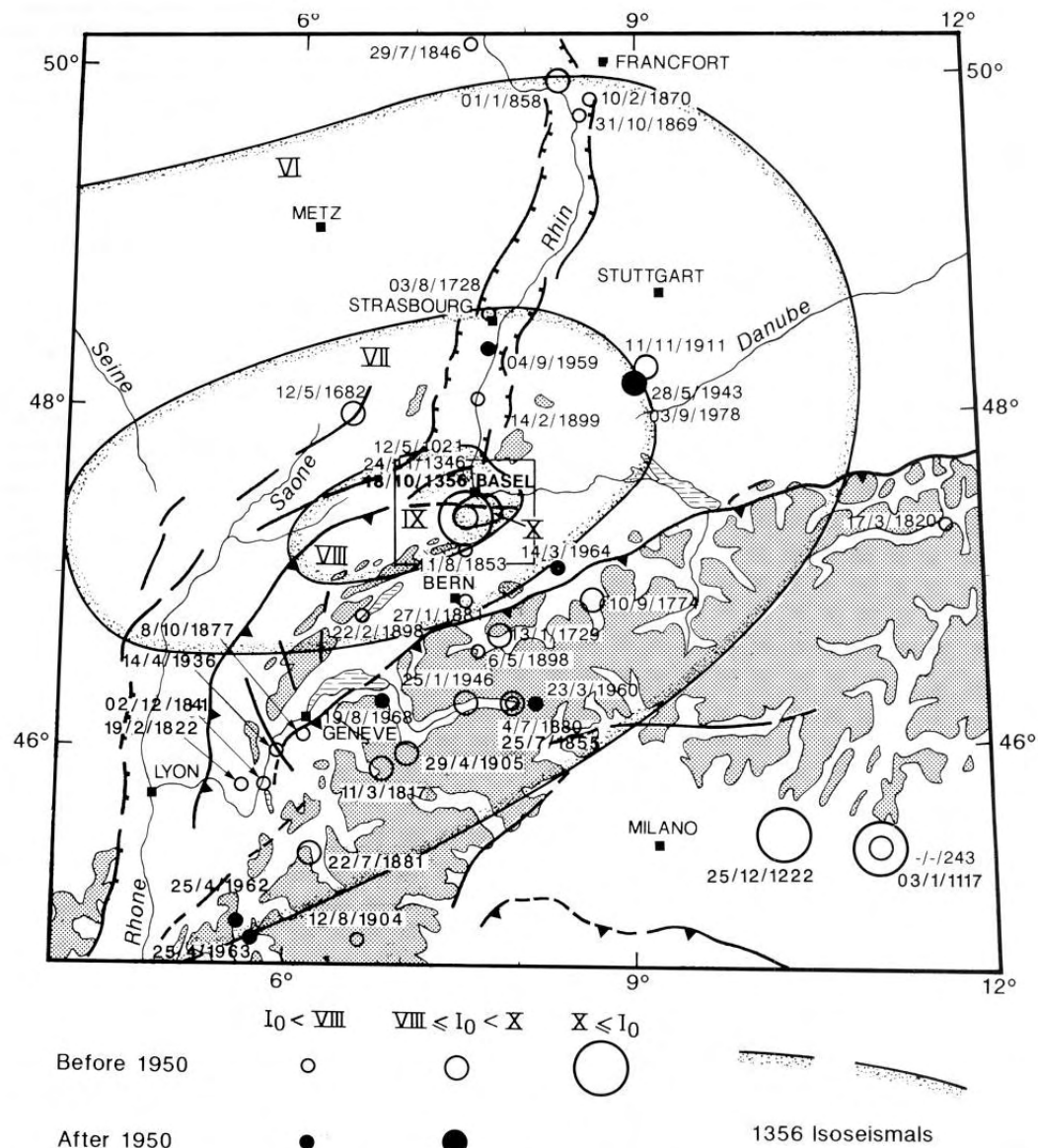
(Lacombe et Mouthereau, 2002)

3, areas of present-day basement-involved shortening inferred from high present-day uplift rates
 4, areas of present-day basement-involved shortening inferred from both high present-day uplift rates and seismicity;
 5, areas of present-day basement-involved shortening inferred from seismicity.

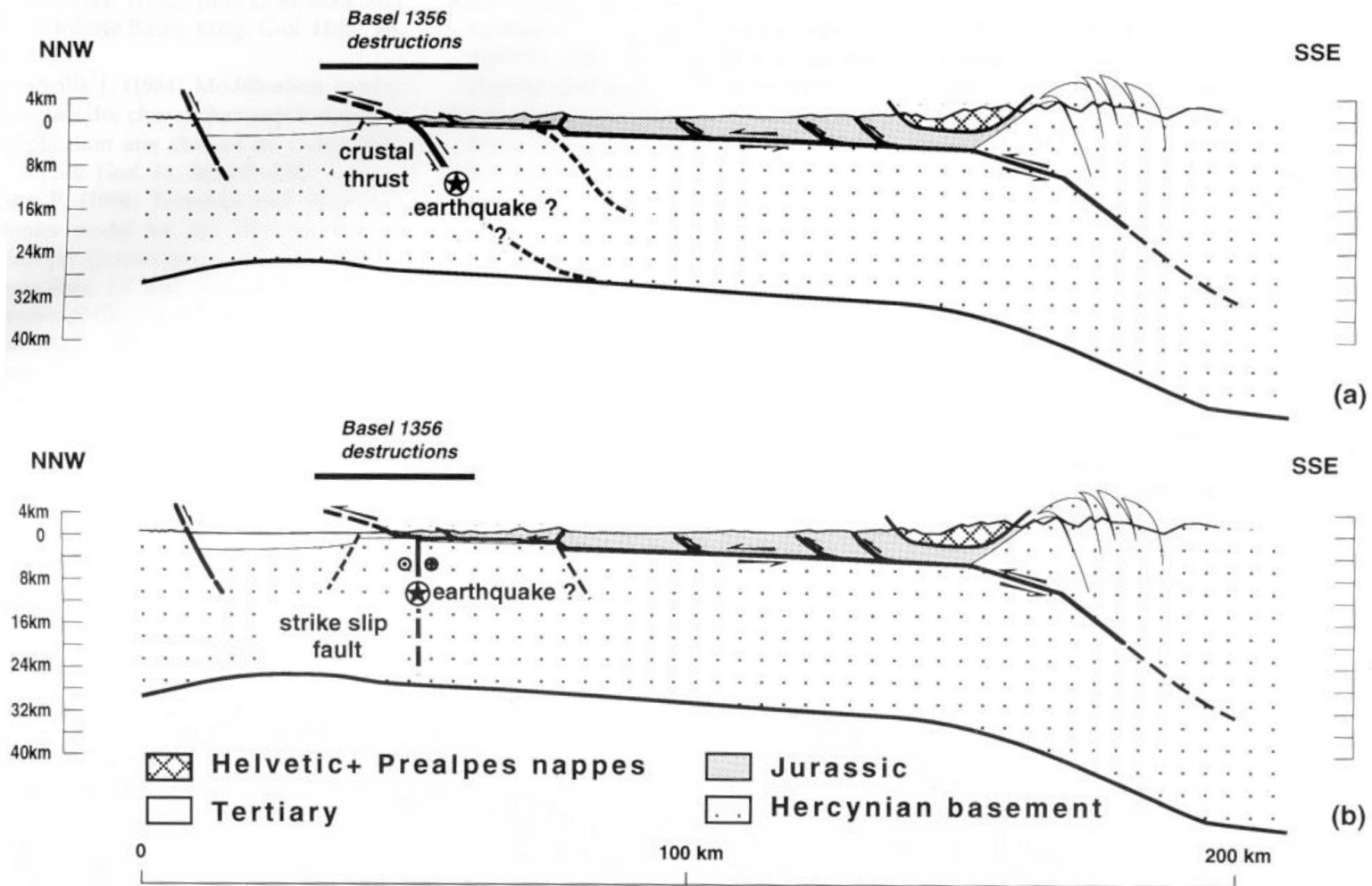
(Lacombe et Mouthereau, 2002)



(Meyer et al., 1994)



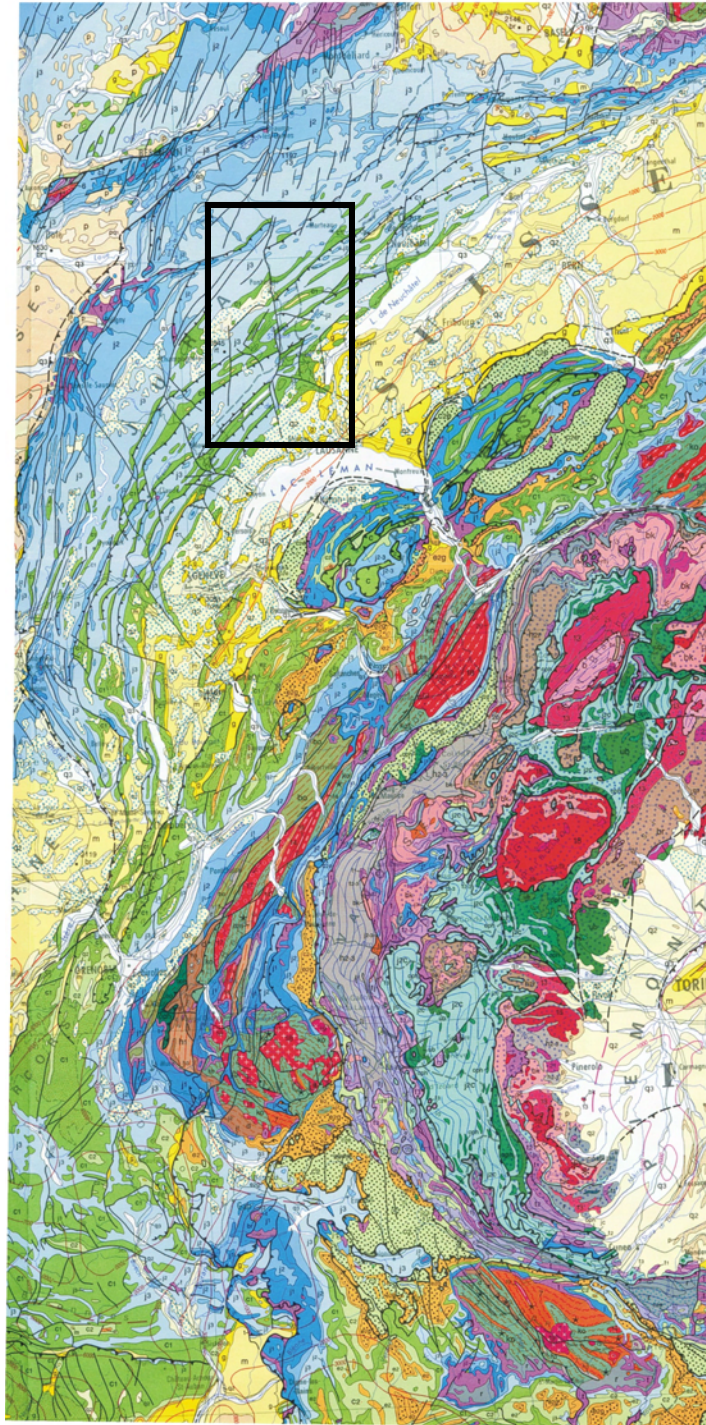
Seismotectonic map of NW Europe and Western Alps. Seismicity, active faults, and elevation contour line 1000 m are from Armijo et al. (1986). Altitudes greater than 1000 m are shaded. Isoseismals of Basel 1356 earthquake are from Mayer-Rosa and Cadiot (1979). Box for Fig. 2b.

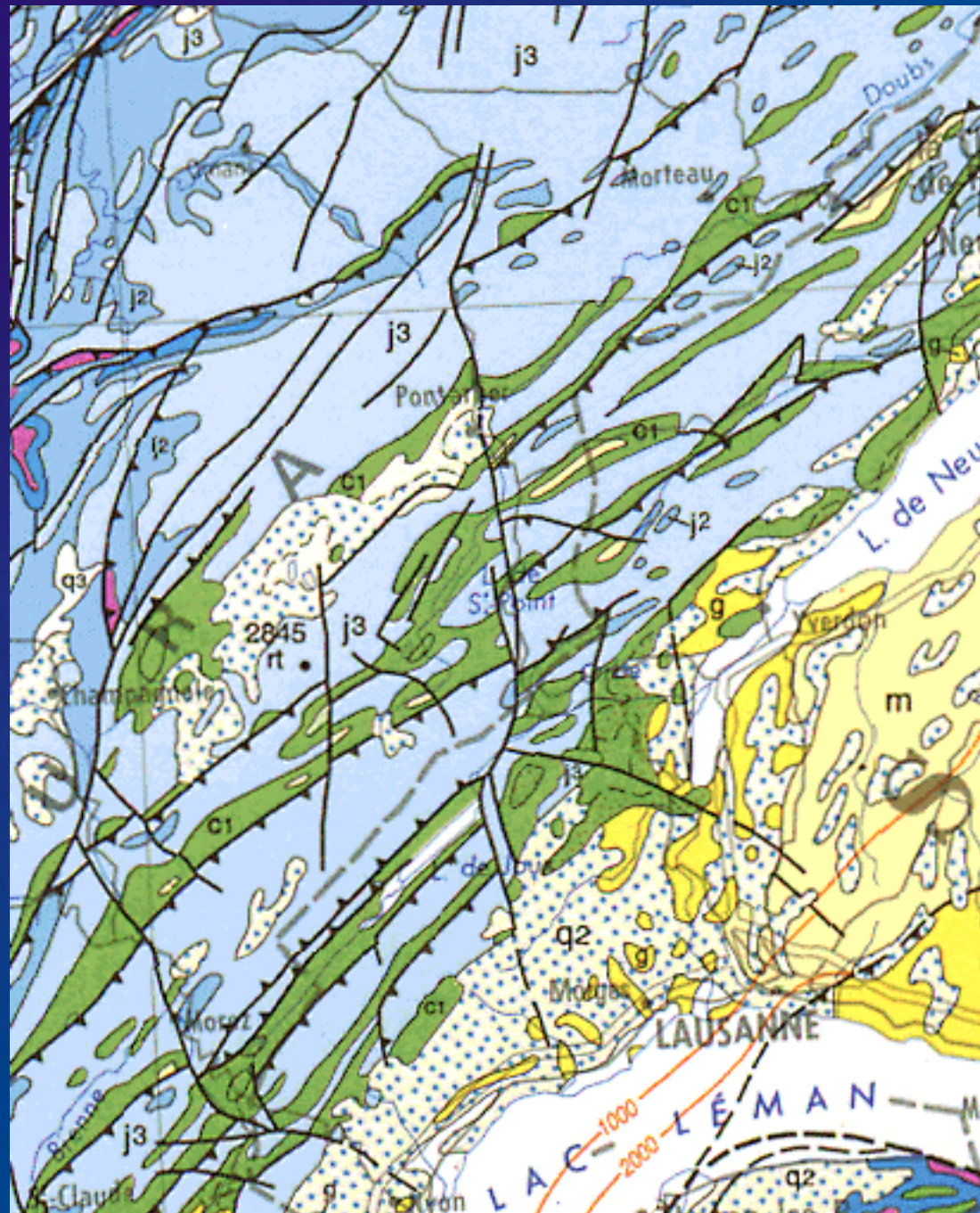


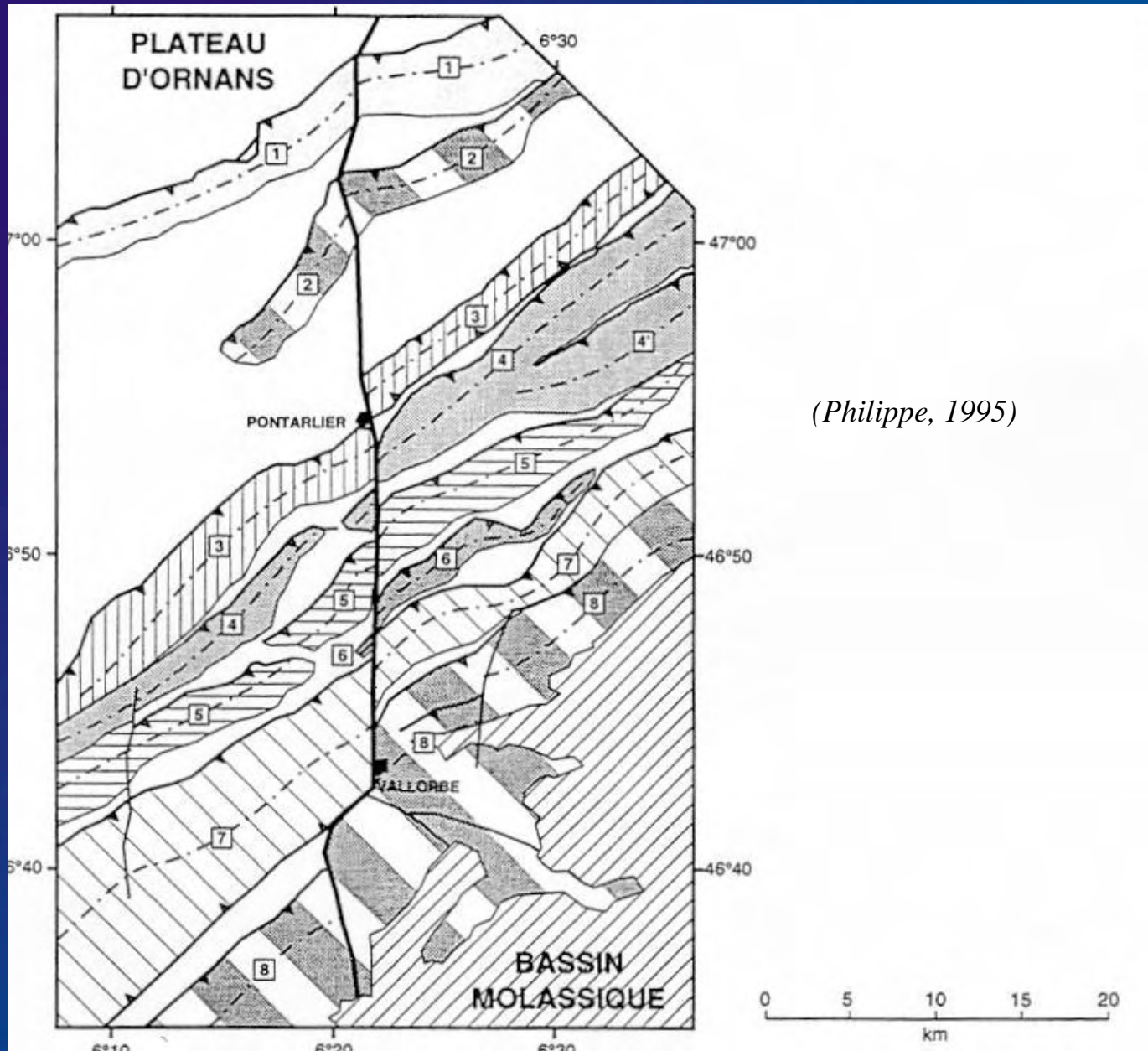
Plausible fault plane geometries for the Basel 1356 earthquake. (a) reactivation of a basement thrust fault beneath the detachment; (b) reactivation of a basement strike-slip fault beneath the detachment.

(Meyer et al., 1994)

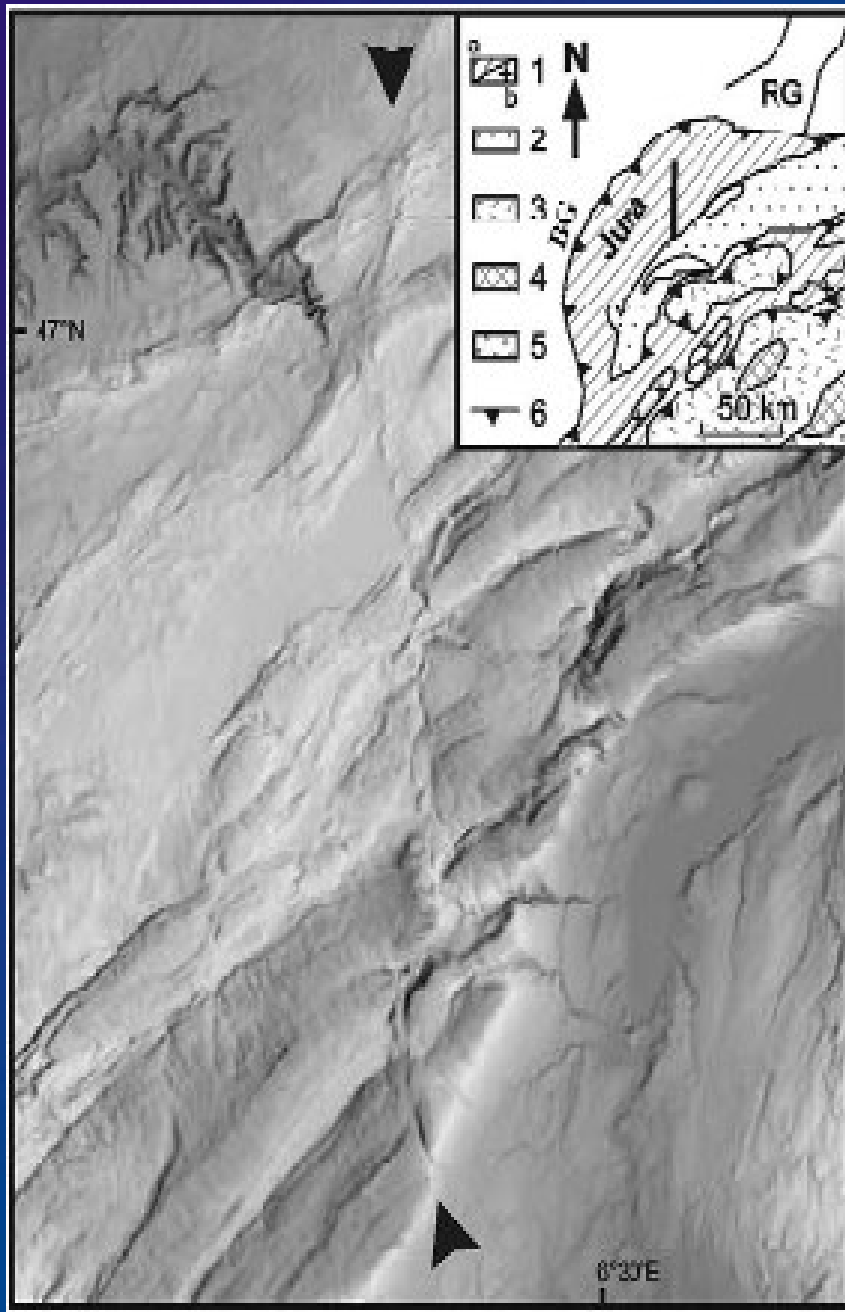
**Les grands décrochements transverses
et les rampes latérales du Jura**



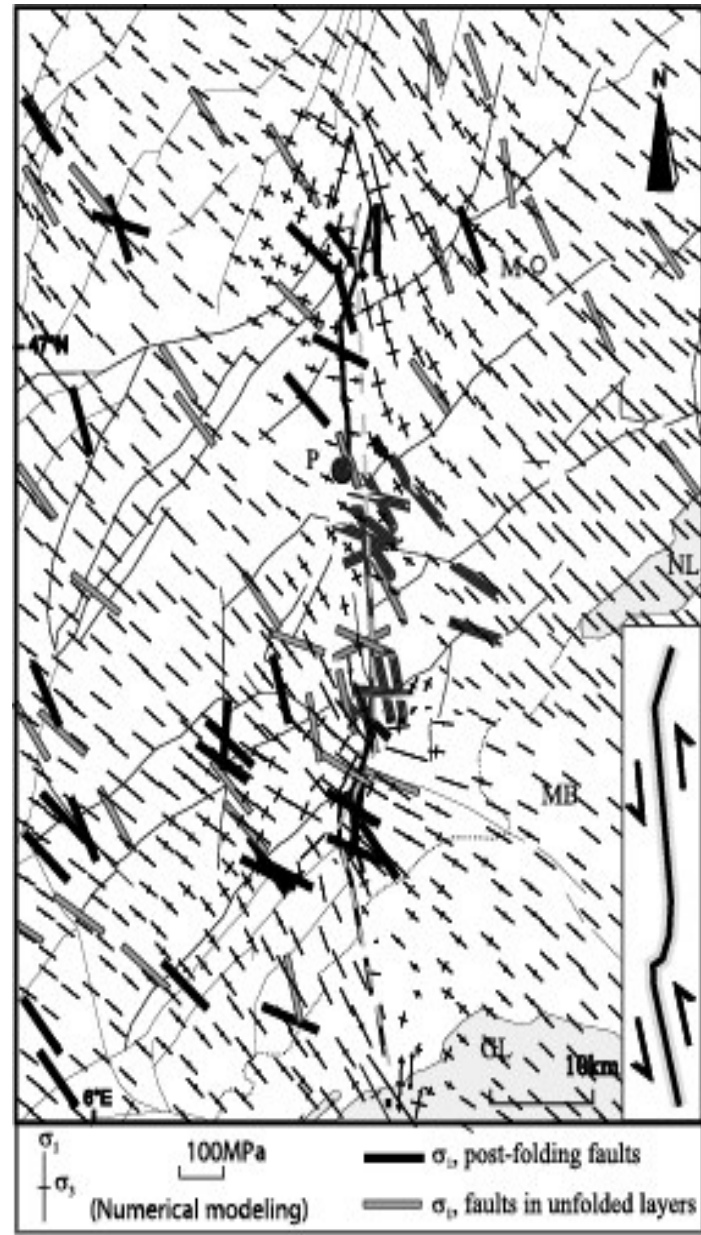
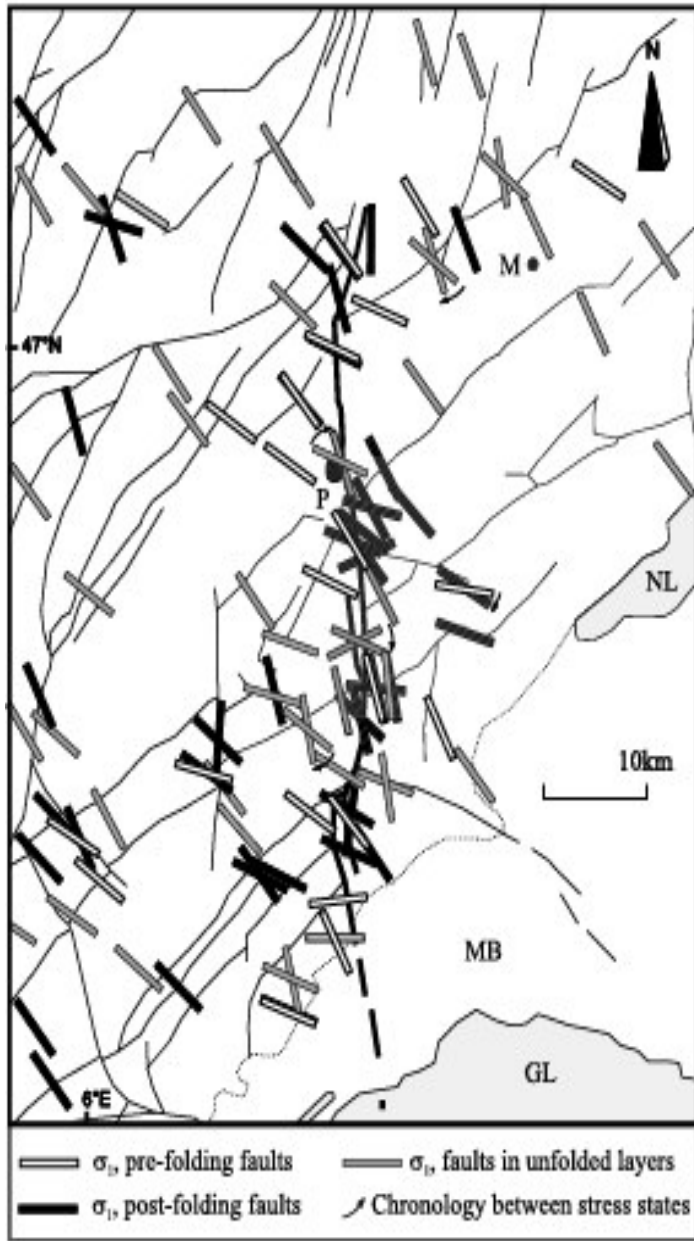




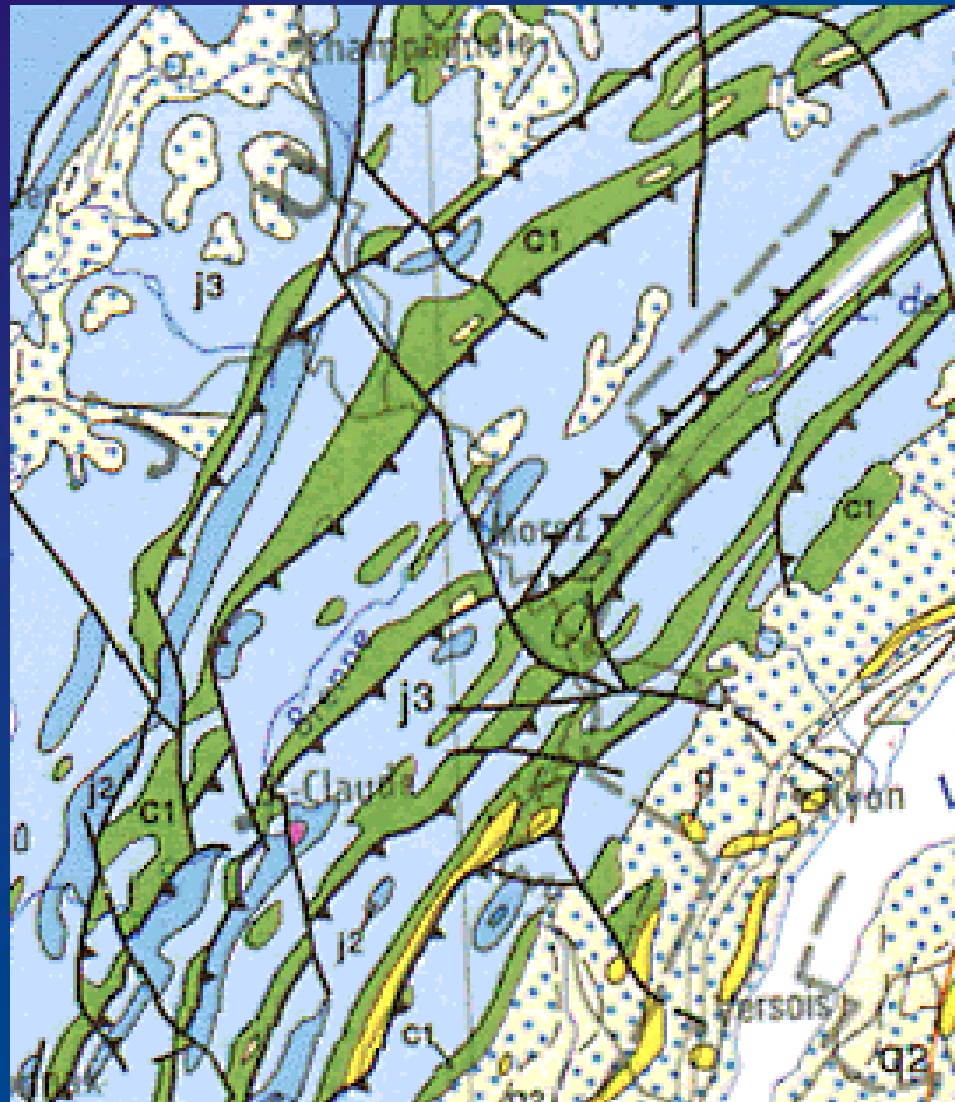
(Philippe, 1995)



(Homberg et al. 2004)



(Homberg et al. 2004)



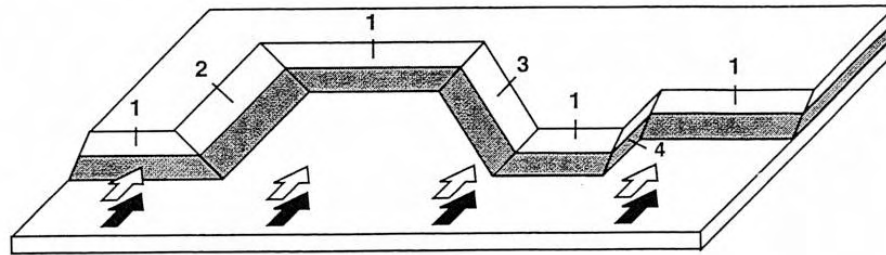


Les rampes sont des structures communes dans les chaînes plissées.

Elles peuvent être regroupées en trois types, frontales, obliques et latérales, selon qu'elles sont perpendiculaires, obliques ou parallèles à la direction de transport régional (Apotria et al., 1992, McClay, 1992).

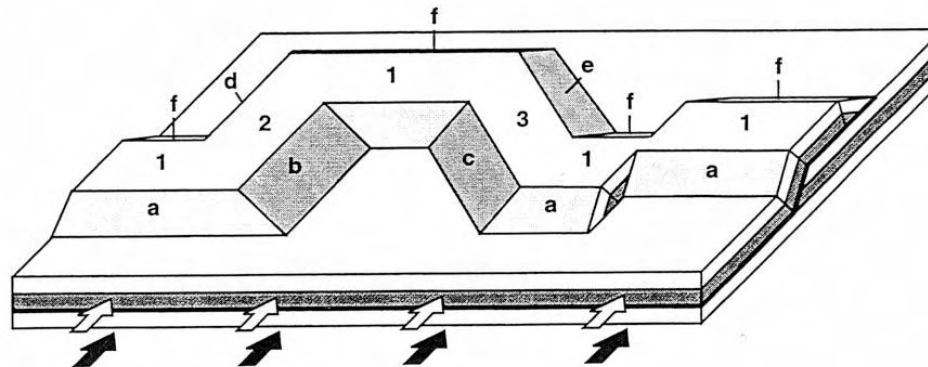
Quand une rampe oblique ou latérale est fortement redressée, il convient plutôt de parler de faille de déchirure, ou "tear fault" (Philippe, 1995): **une faille de déchirure primaire** est un accident sub-vertical qui délimite deux compartiments ayant subi la même quantité de raccourcissement total, mais qui peut être accommodée différemment, de telle sorte qu' il n'y a dans ce cas aucune correspondance entre les structures situées de part et d'autre de la faille; d'un point de vue cinématique, elle est sub-parallèle à la direction de transport locale et contemporaine de la formation des plis associés.

Les failles de déchirure secondaires, ou décrochements de couverture, provoquent le décalage de plis déjà (partiellement ou totalement) formés et apparaissent tardivement en réponse à un cisaillement simple vertical. Ces dernières sont plus ou moins obliques par rapport à la direction de raccourcissement; le décalage tardif des chevauchements frontaux à la faveur d'une faille de déchirement secondaire s'accompagne donc d'une extension longitudinale.



- 1: rampe frontale
- 2: rampe latérale
- 3: rampe oblique ou transverse
- 4: faille de déchirement (primaire)

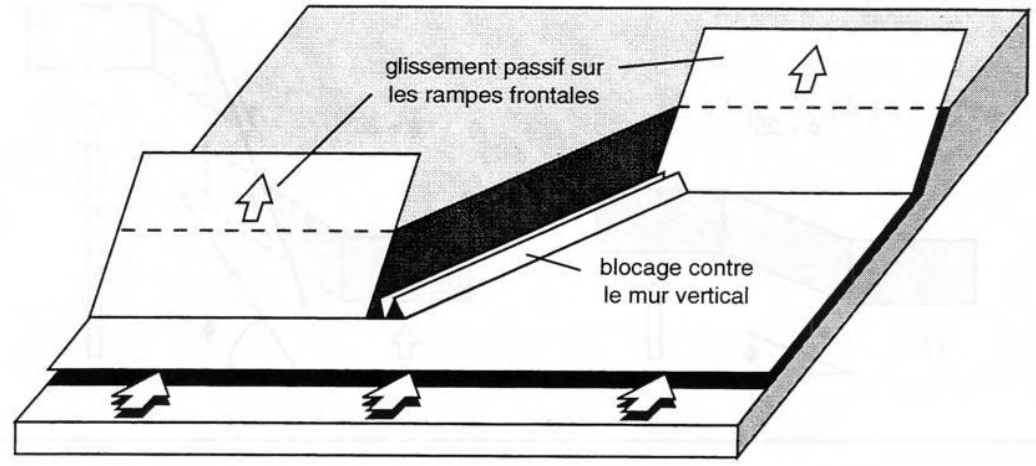
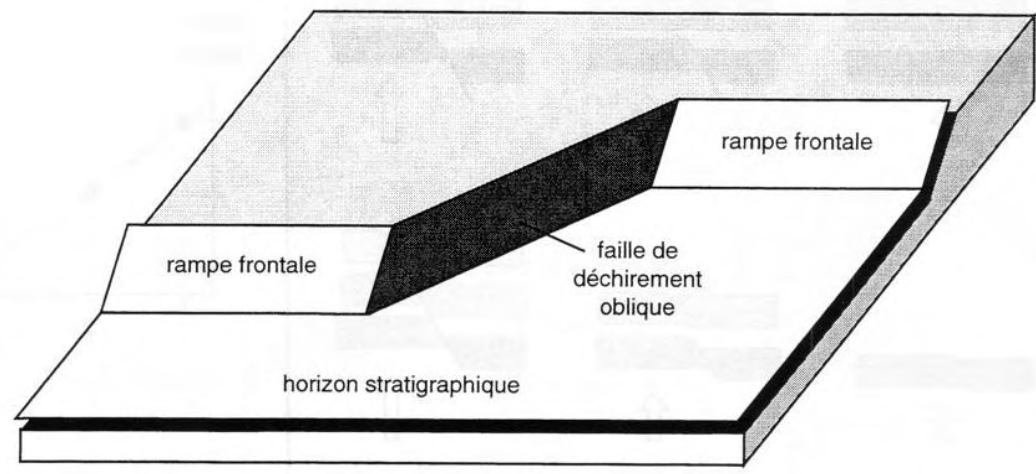
Définitions des différents types de rampes de chevauchement (Butler, 1982; modifié).



- 1: anticlinal frontal
- 2: anticlinal latéral
- 3: anticlinal oblique ou transverse

- a: mur dorsal
- b: mur lateral dorsal
- c: mur oblique dorsal
- d: mur lateral frontal
- e: mur oblique frontal
- f: mur frontal

(Philippe, 1995)



(Philippe, 1995)

Faille de déchirement primaire: problème d'obliquité par rapport à la direction de transport.

Les modélisations analogiques et analytiques (Apotria et al., 1992; Calassou et al., 1993; Philippe, 1995] montrent qu'au sein d'une nappe en mouvement au-dessus d'un décollement des structures transverses (rampes latérales ou obliques, failles de déchirement) peuvent apparaître en réponse à des variations latérales d'épaisseur sédimentaire liées à la géométrie du socle, à une bordure de bassin ou à la terminaison du niveau de décollement qui s'assimile à une limite forte-faible friction basale.

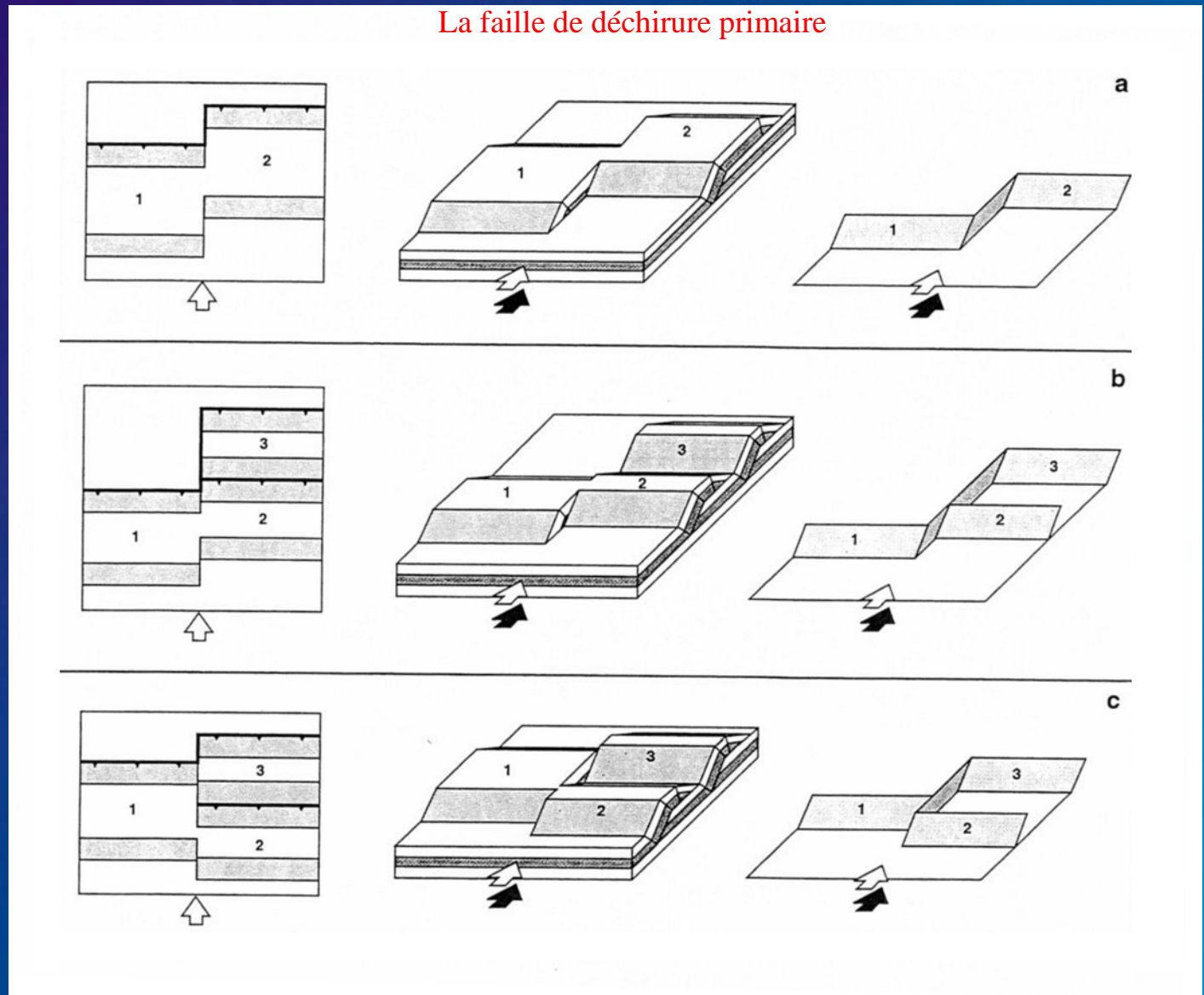
Ces zones de transfert accommodent ainsi les décalages de structures et les incompatibilités cinématiques locales.

Les structures situées de part et d'autre de la faille de déchirure sont synchrones et la quantité de raccourcissement est constante.

a: les 2 écailles sont identiques, ce qui peut faire penser que le décalage s'est produit postérieurement à la formation des anticlinaux de rampe. Or le décalage latéral du front de chevauchement est rigoureusement contemporain de la croissance des anticlinaux.

b et c: la même quantité de raccourcissement est accommodée différemment de part et d'autre de la faille, ce qui fait qu'il n'y a aucune corrélation possible entre les structures. En fonction de la position relative des plis dans chacun des compartiments, le sens de mouvement apparent le long de la faille peut s'inverser: dans le cas c, le décalage est apparemment sénestre entre les plis 1 et 3, et dextre entre les plis 1 et 2. Il ne faut pas attribuer un jeu décrochant à une faille de déchirement primaire car les axes de plis ne constituent pas des marqueurs passifs.

La faille de déchirure primaire



(Philippe, 1995)

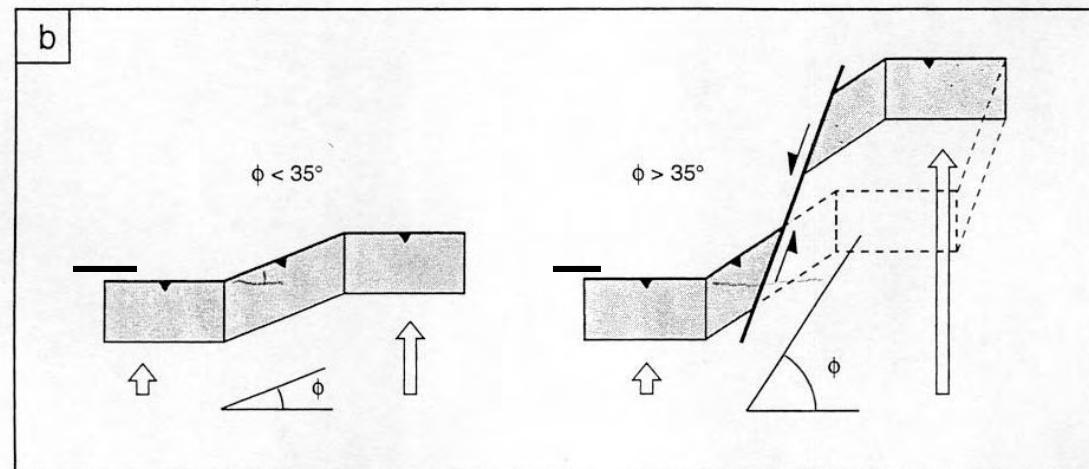
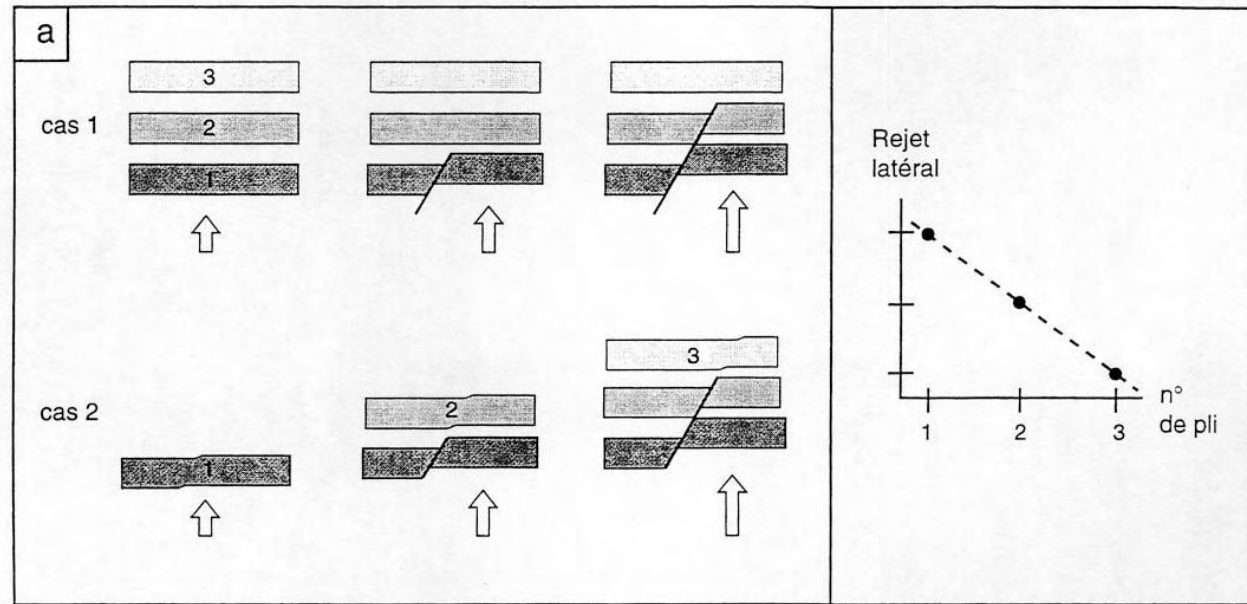
La faille de déchirure secondaire

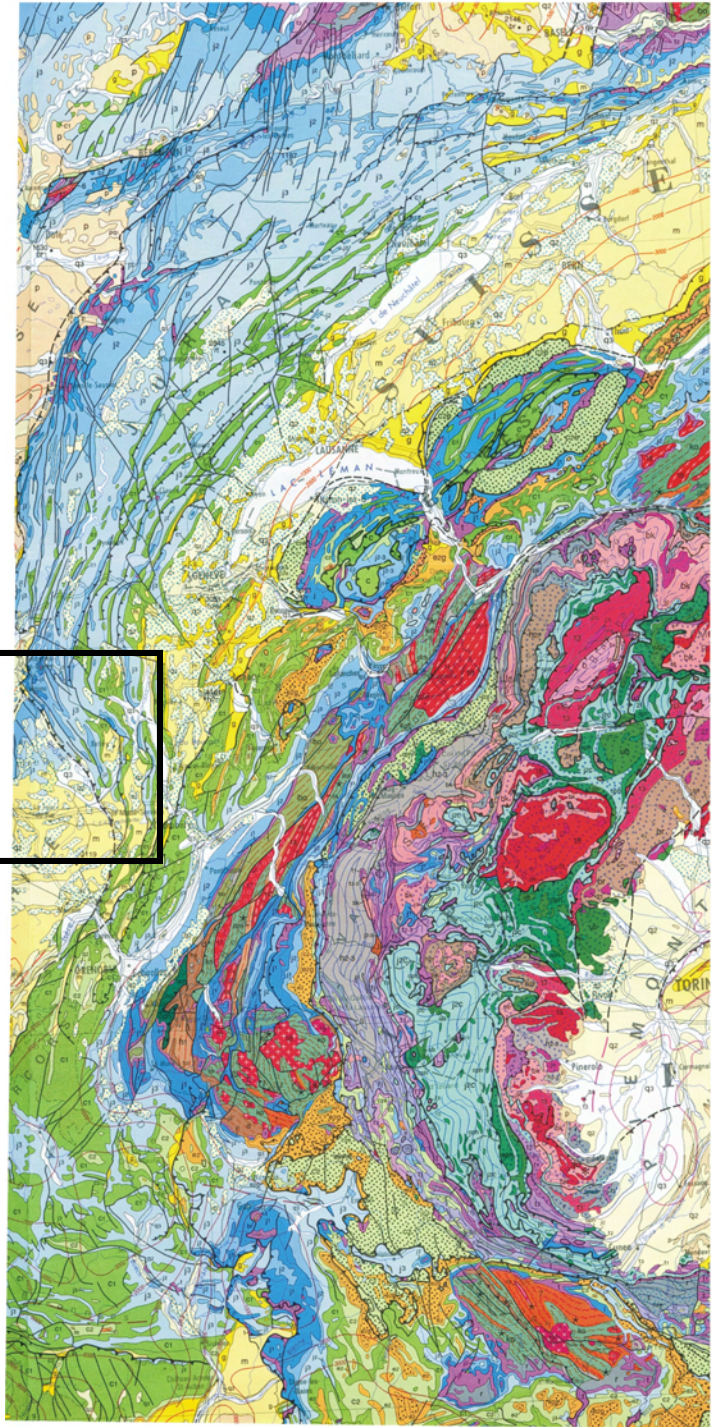
Il s'agit d'une faille décrochante tardive oblique à la direction de transport tectonique qui affecte des structures plicatives pré-existantes.

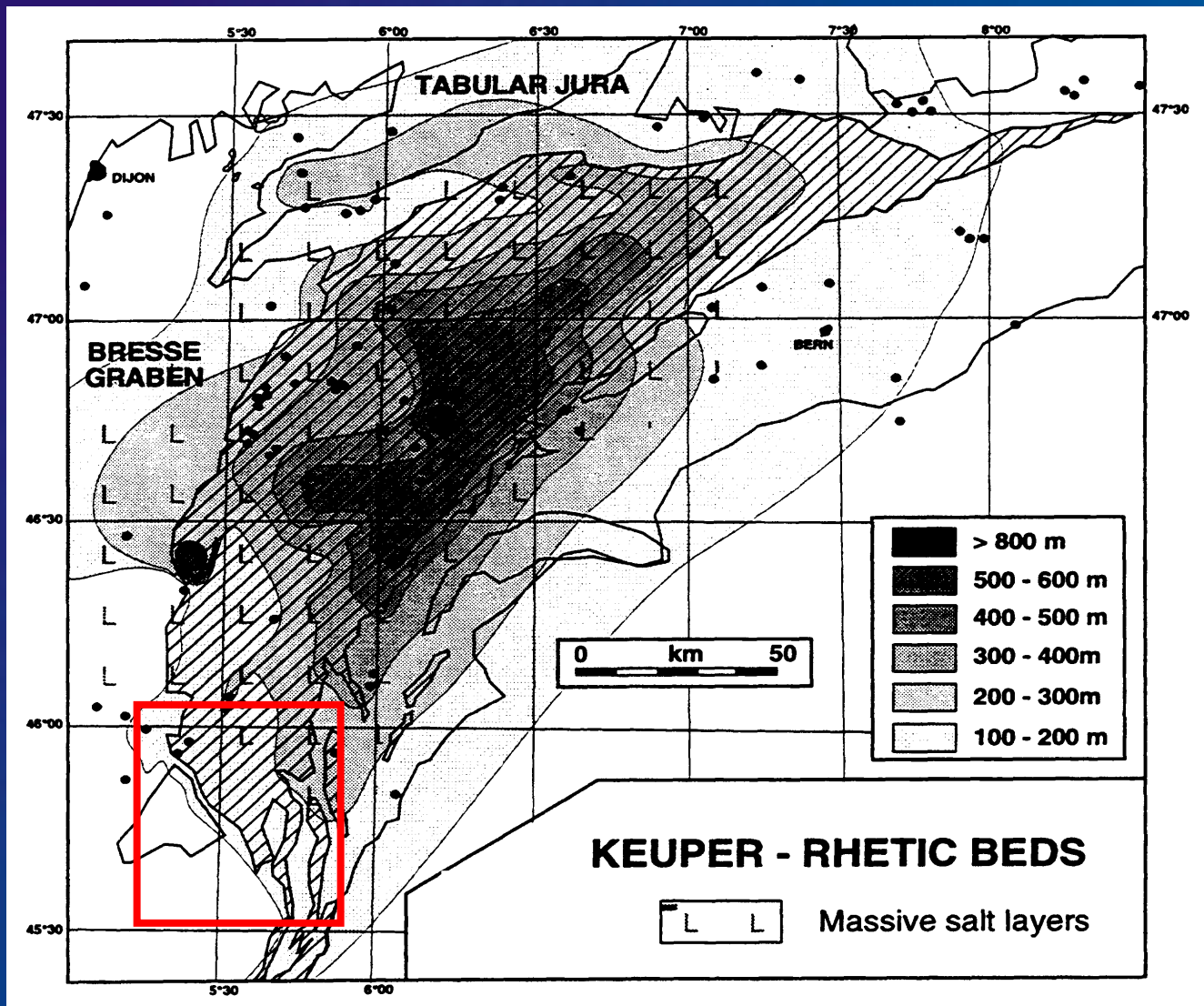
La présence d'un tel accident implique une variation longitudinale du raccourcissement à l'arrière et une extension latérale fonction de l'angle entre l'azimut de la faille et l'orientation du transport tectonique.

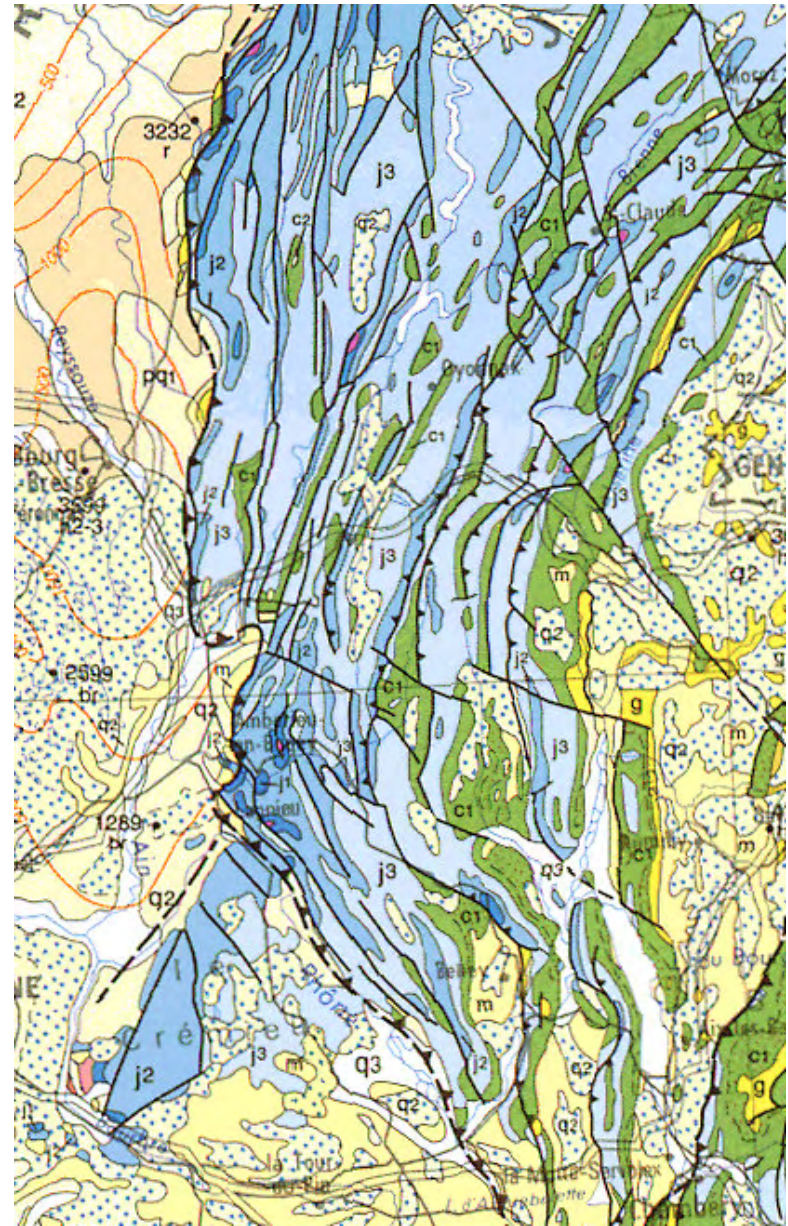
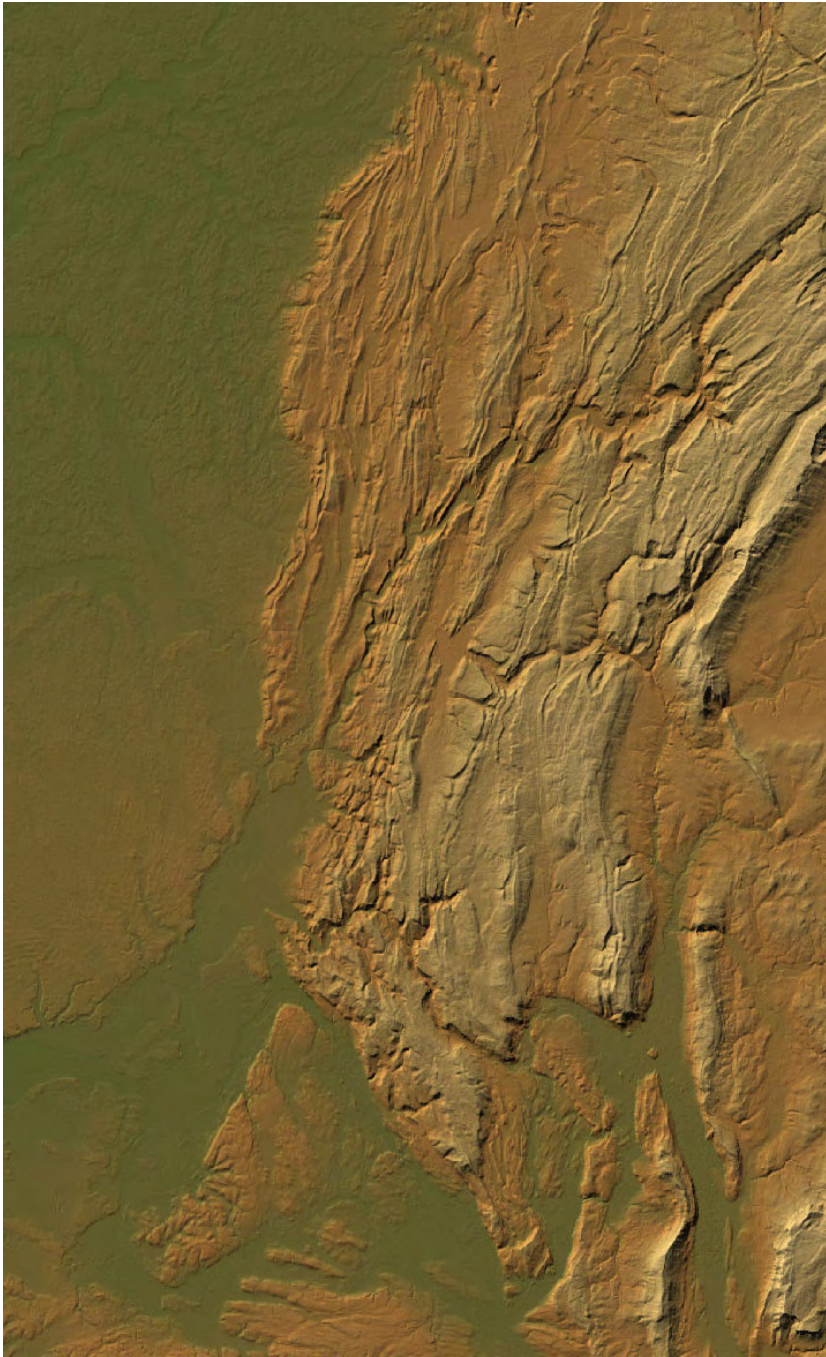
a: la faille de déchirure est tardive par rapport aux plis qui montrent un resserrement des flancs plus important d'un côté que de l'autre de la faille. La valeur du rejet horizontal diminue vers l'avant-pays

b: apparition d'une faille de déchirure secondaire lorsque l'angle de déplacement différentiel sur le chevauchement atteint une valeur critique de 30-35° (d'après Wilkinson, 1992).

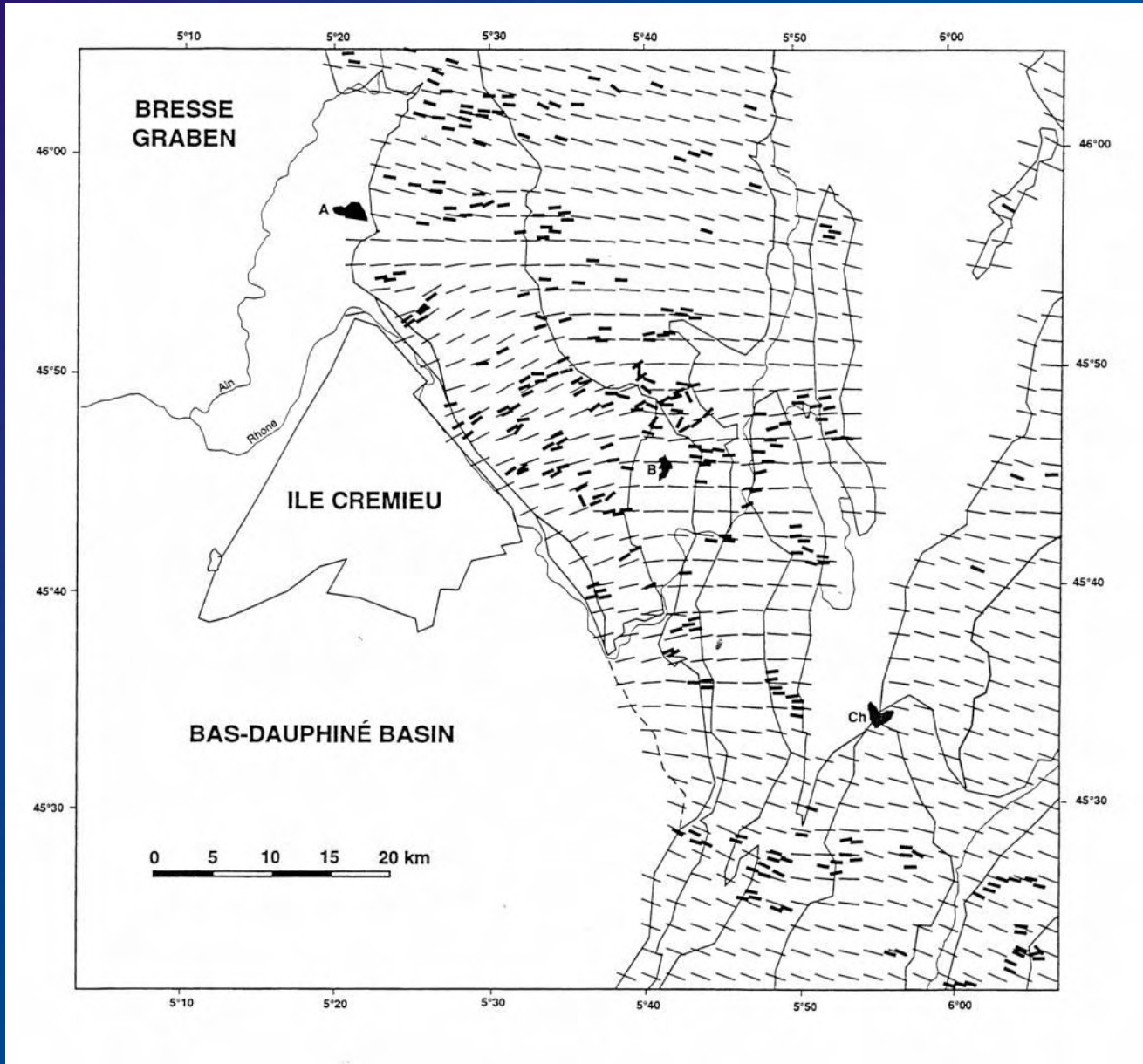




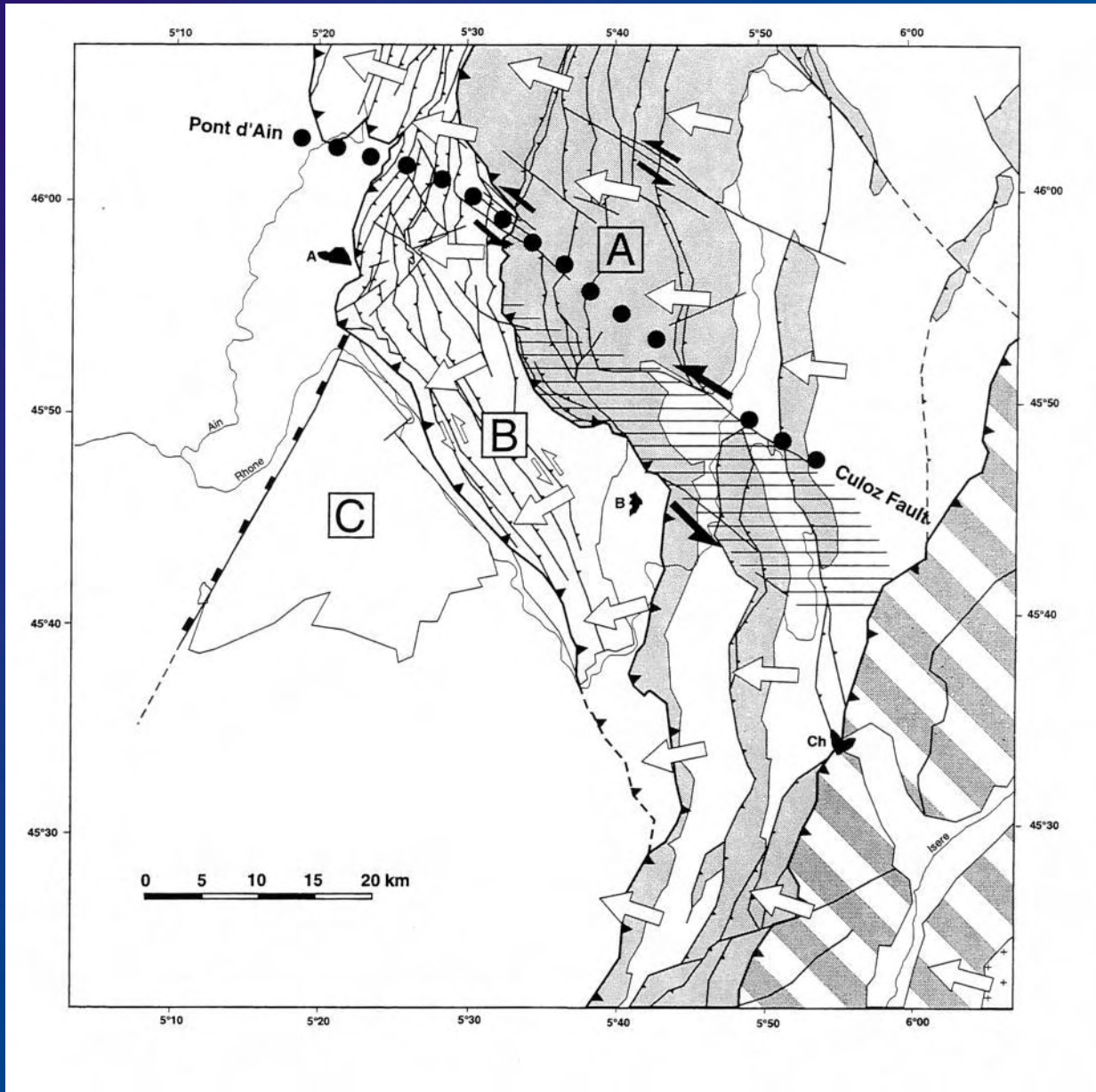




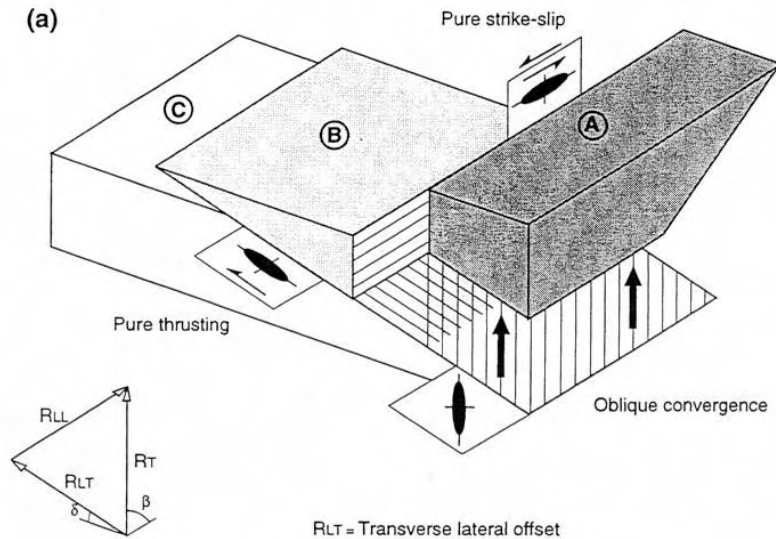
(Philippe, 1995)



(Philippe, 1995)



(a)

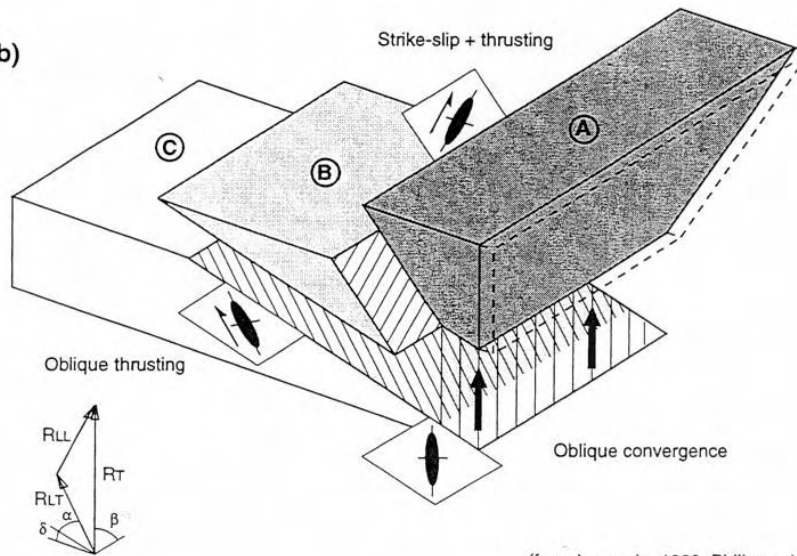


RLT = Transverse lateral offset

RLL = Along-strike lateral offset

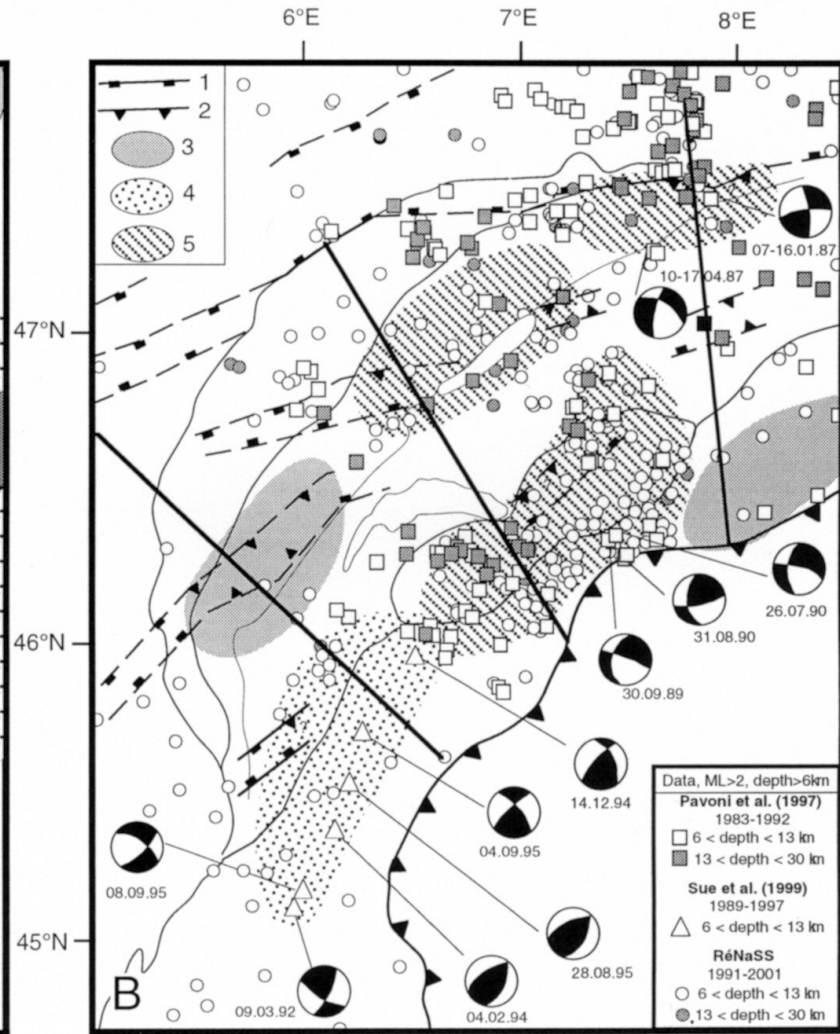
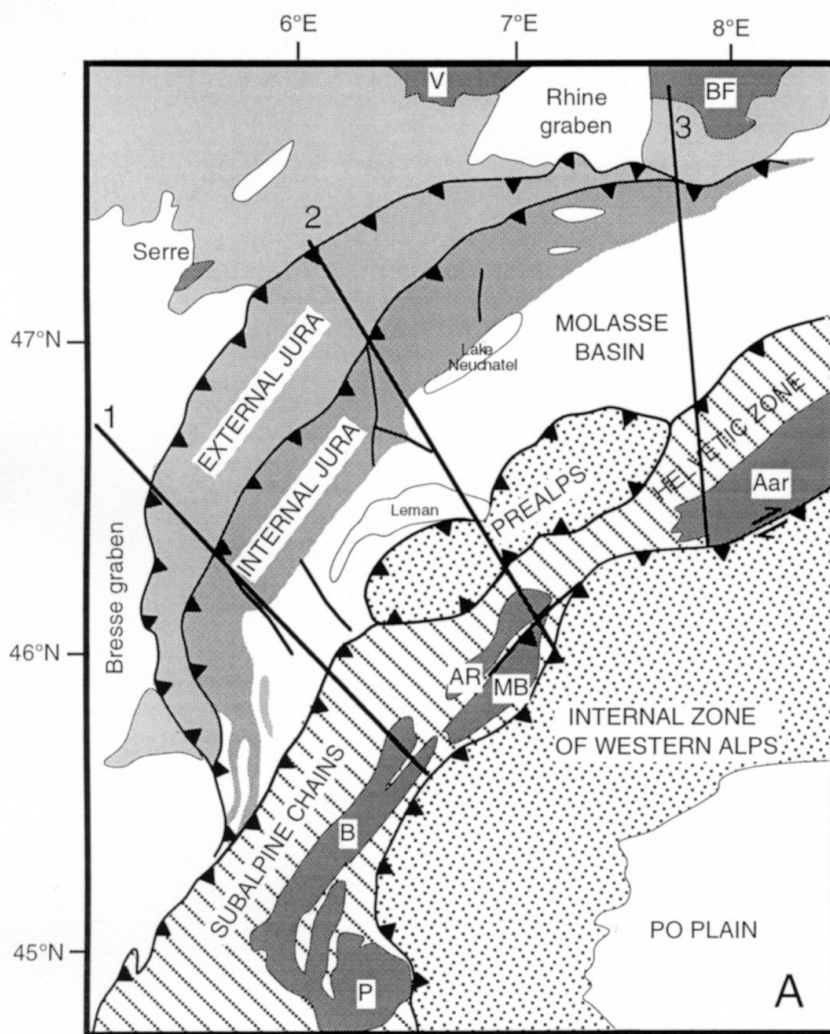
RLT = Total oblique offset

(b)



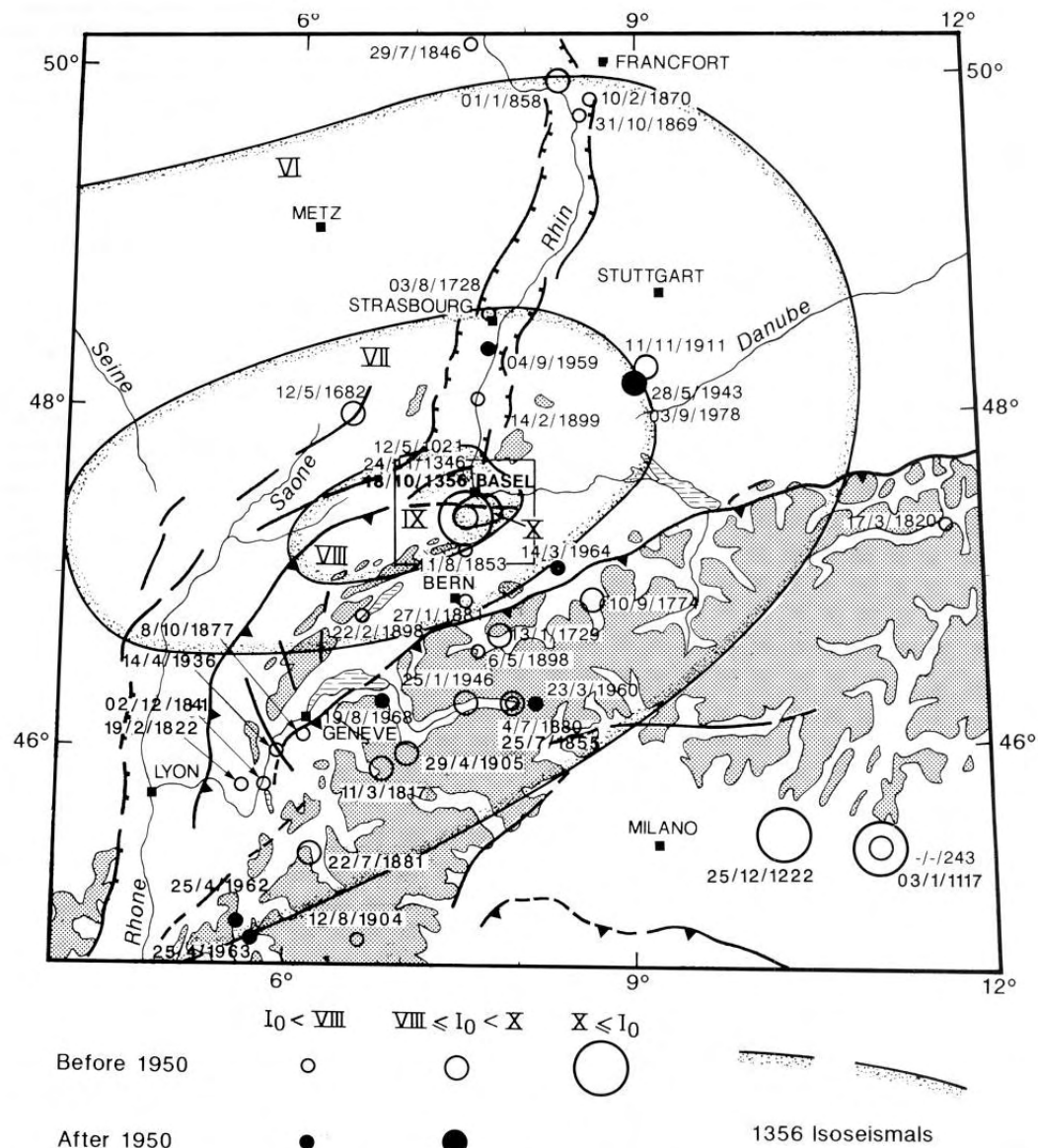
(from Lacassin, 1989; Philippe, 1994)

Une chaîne de montagnes encore active

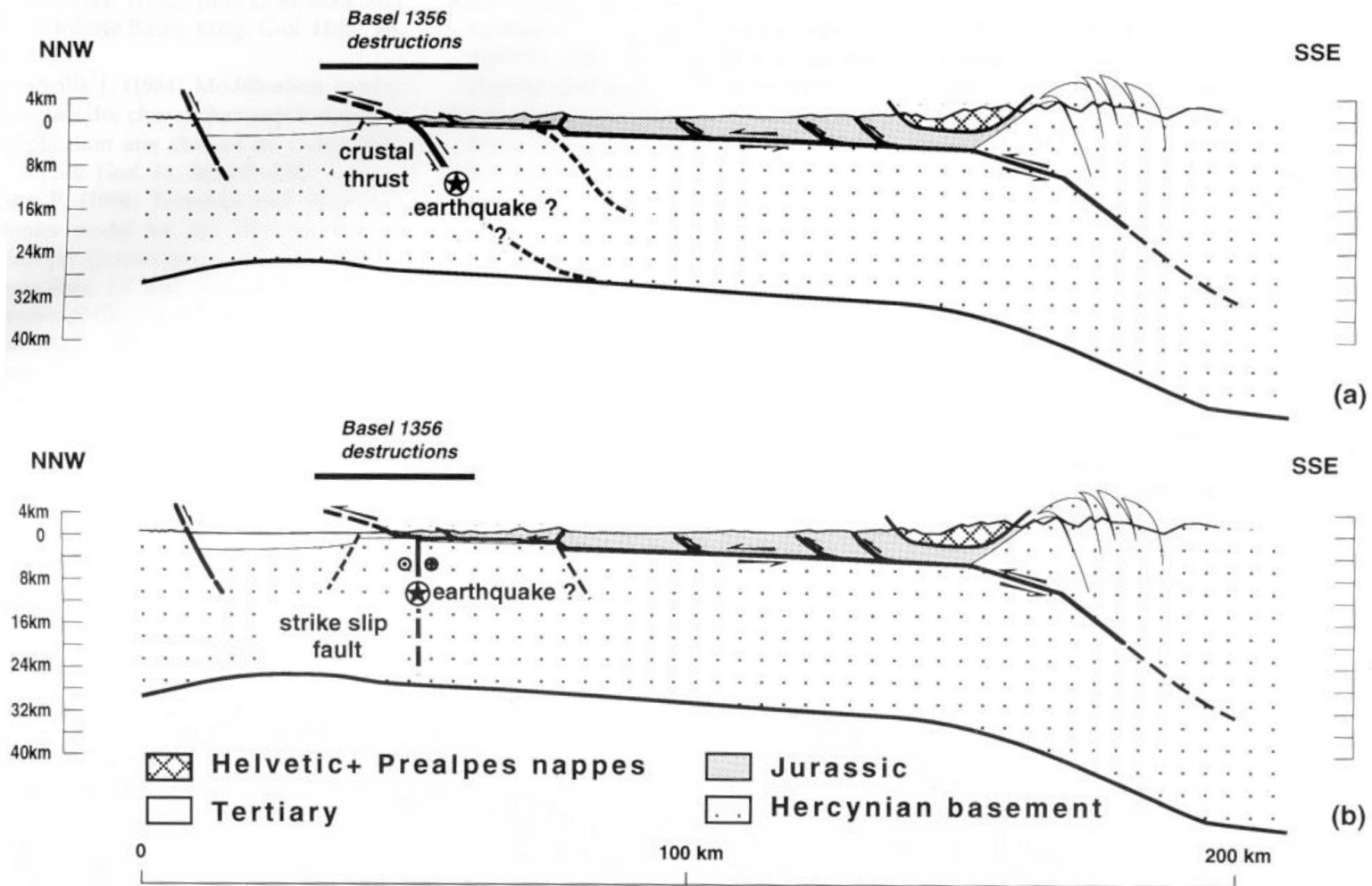


(Lacombe et Mouthereau, 2002)

(Meyer et al., 1994)

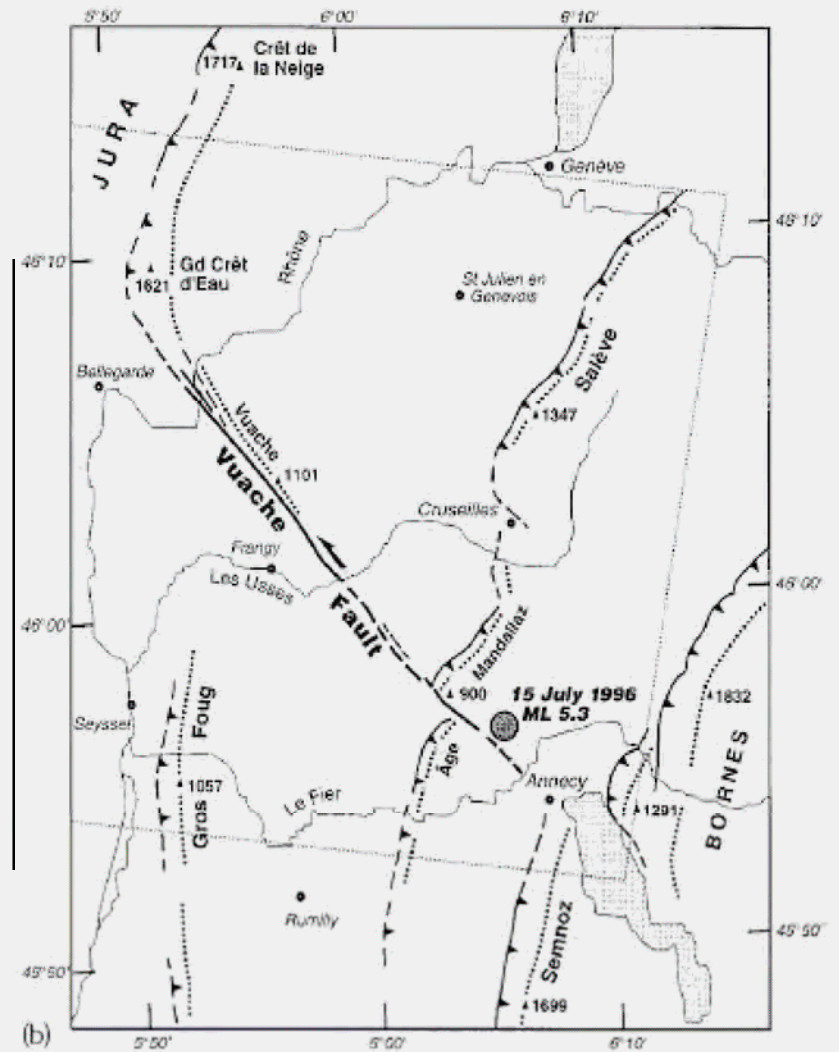


Seismotectonic map of NW Europe and Western Alps. Seismicity, active faults, and elevation contour line 1000 m are from Armijo et al. (1986). Altitudes greater than 1000 m are shaded. Isoseismals of Basel 1356 earthquake are from Mayer-Rosa and Cadiot (1979). Box for Fig. 2b.



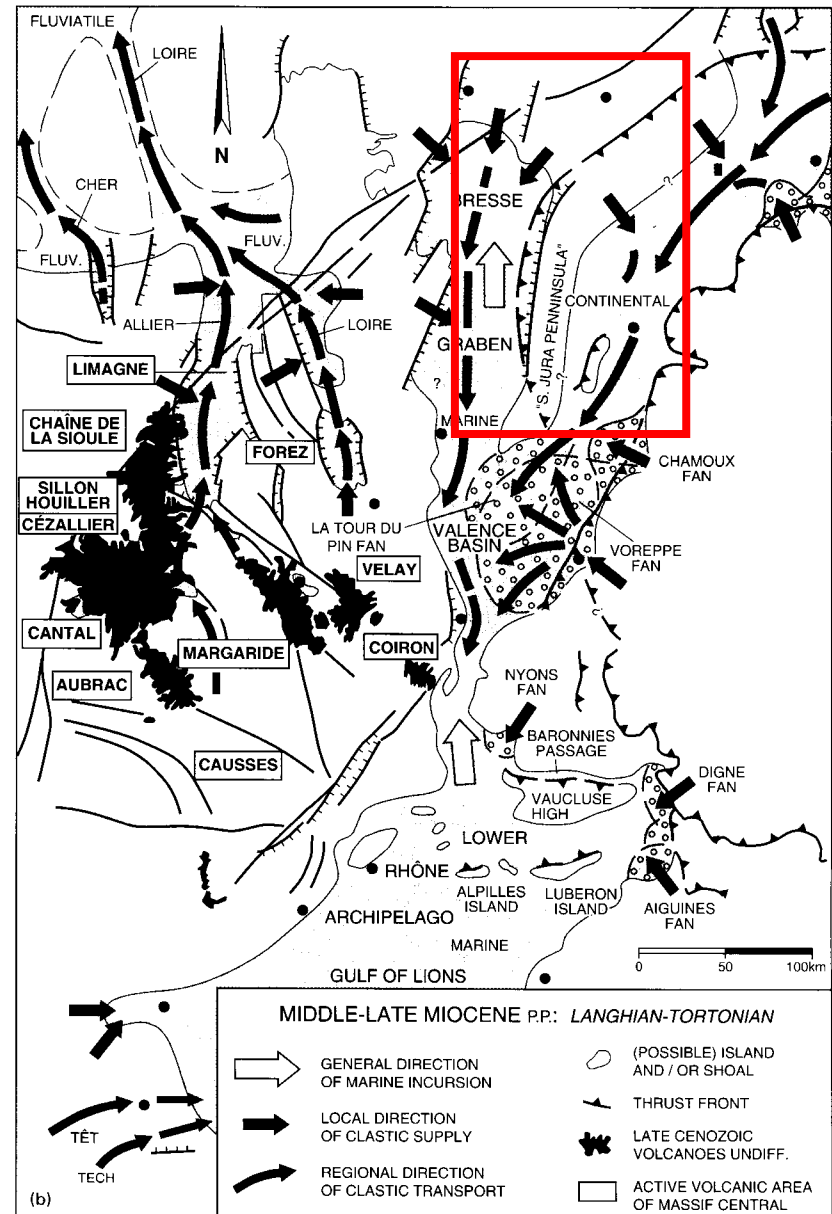
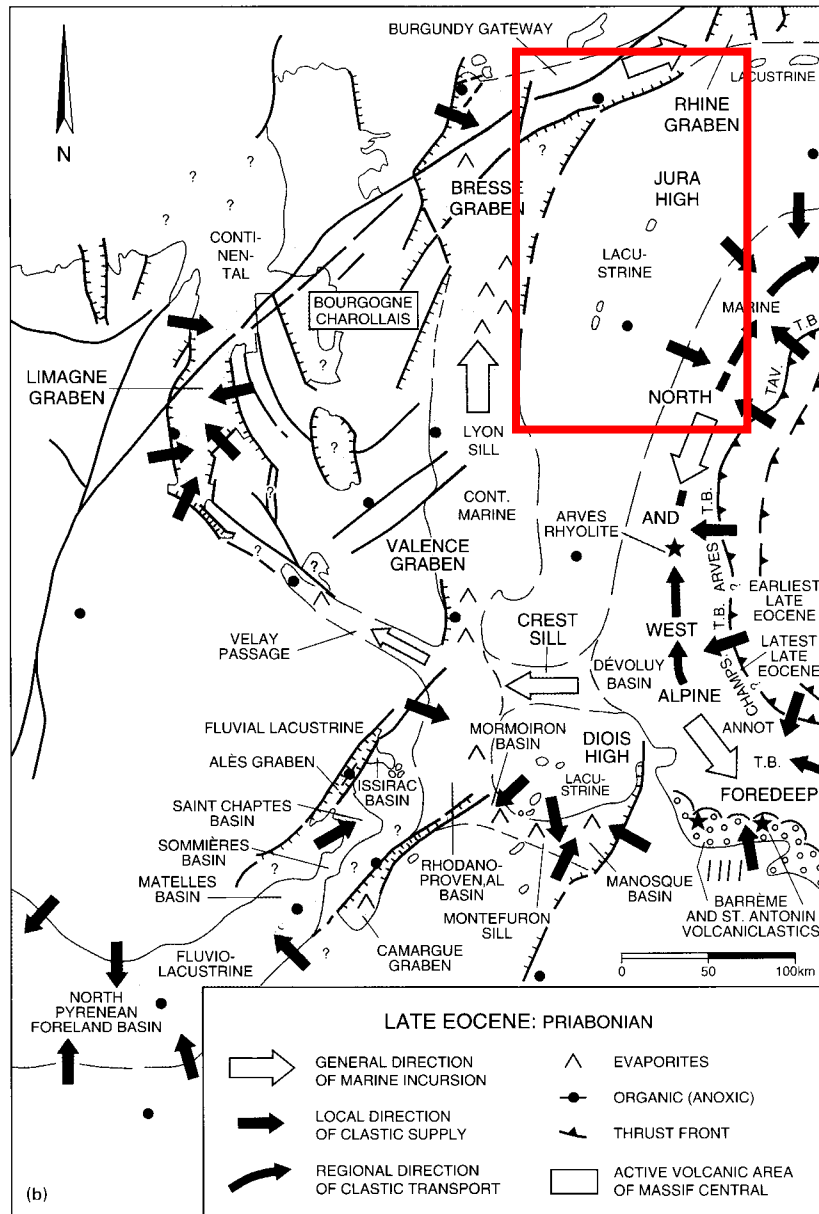
Plausible fault plane geometries for the Basel 1356 earthquake. (a) reactivation of a basement thrust fault beneath the detachment; (b) reactivation of a basement strike-slip fault beneath the detachment.

(Meyer et al., 1994)



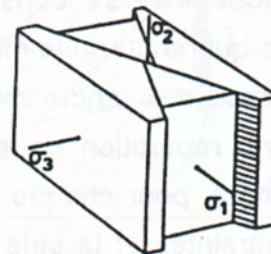
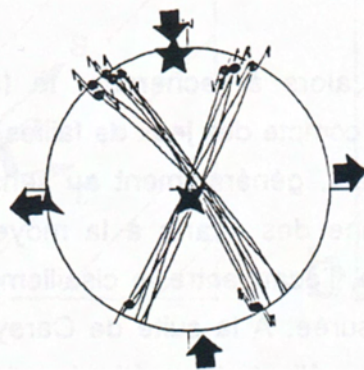
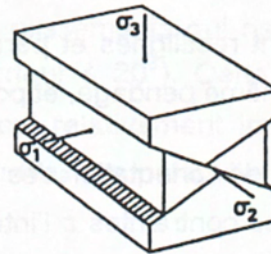
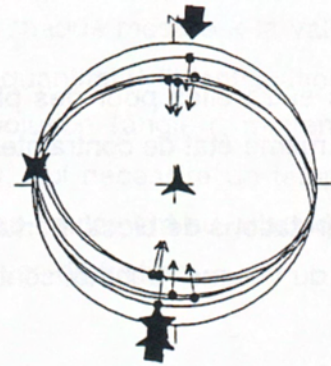
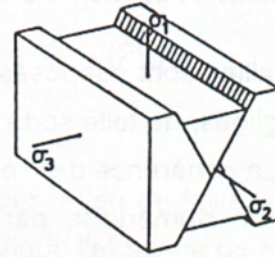
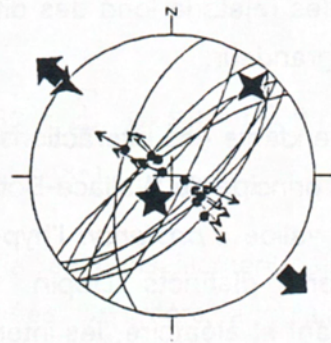
(Thouvenot et al., 1998)

Histoire tectonique du Jura

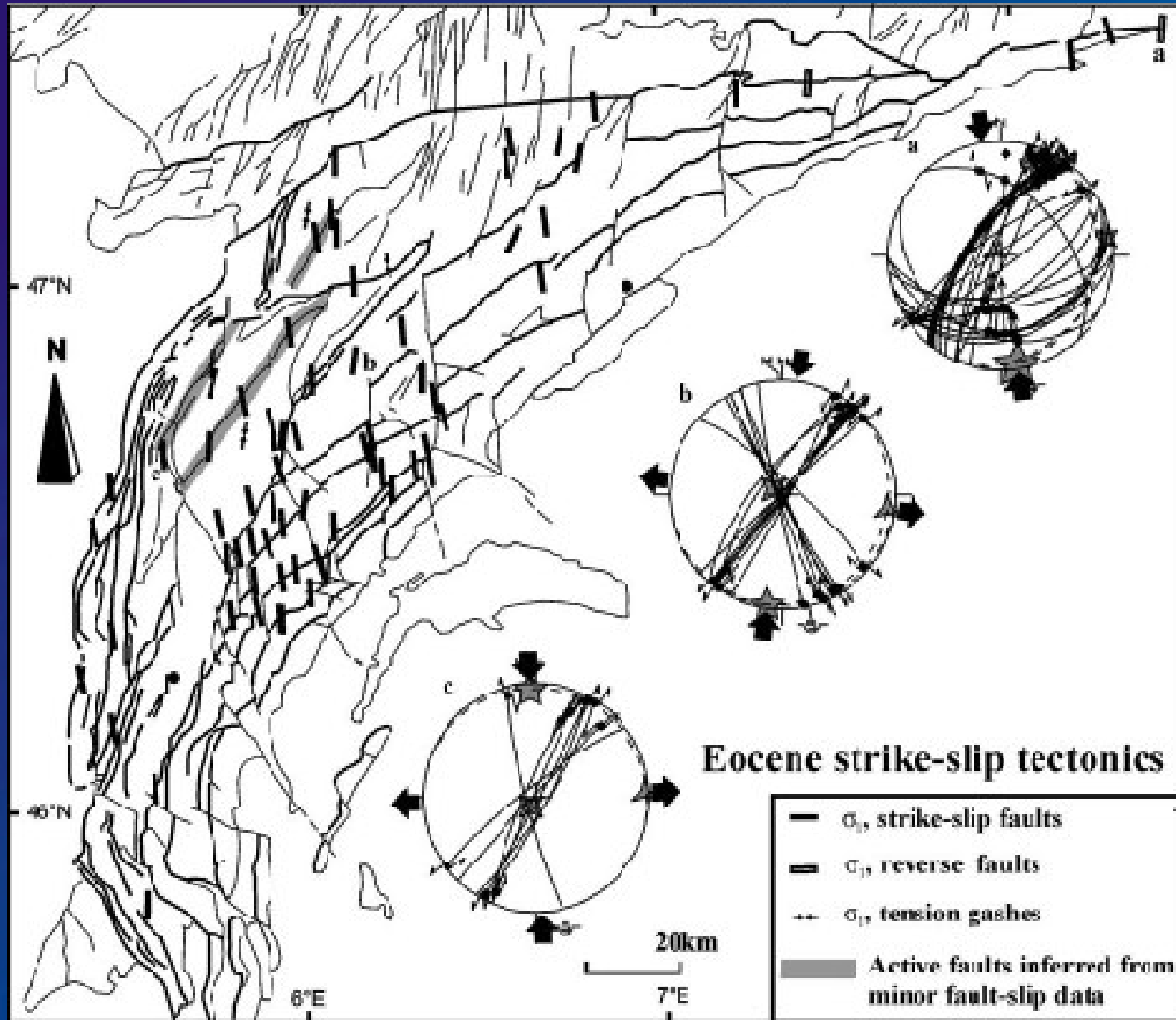


(Sissingh, 1998)

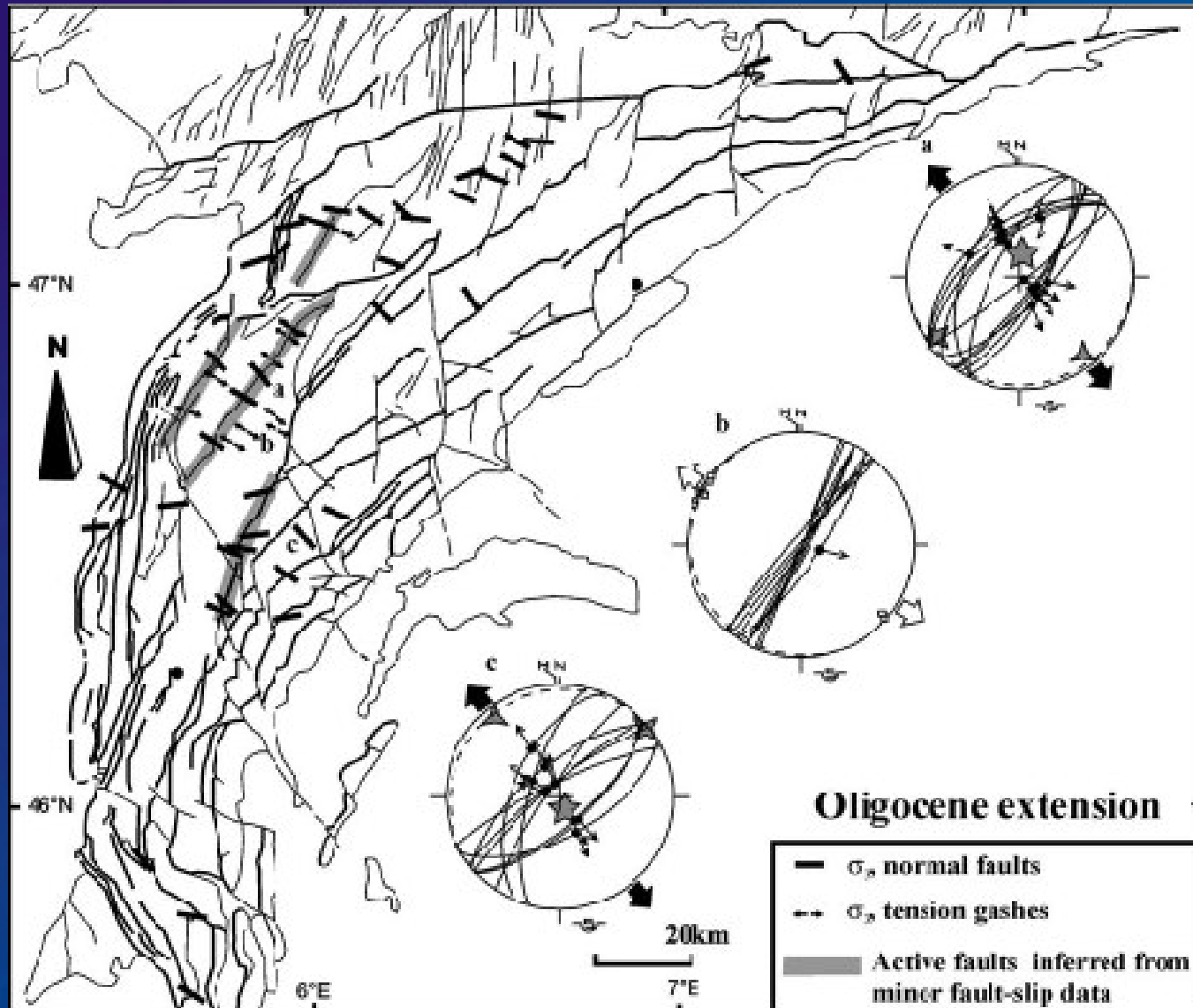




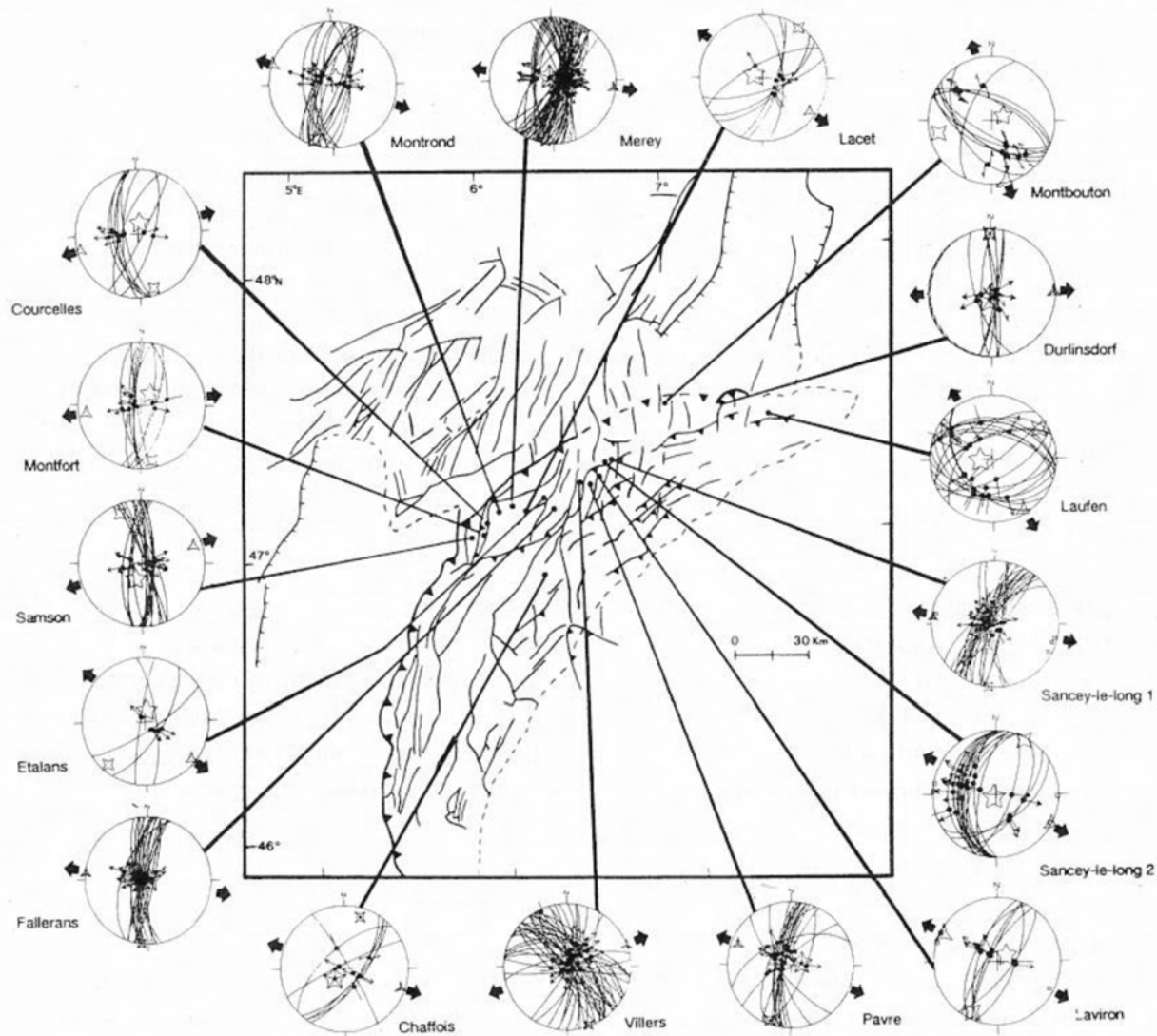
Géométrie des systèmes conjugués (failles normales, inverses et décrochantes) en projection stéréographique et en blocs-diagrammes.



(Homberg et al. 2002)



(Homberg et al. 2002)

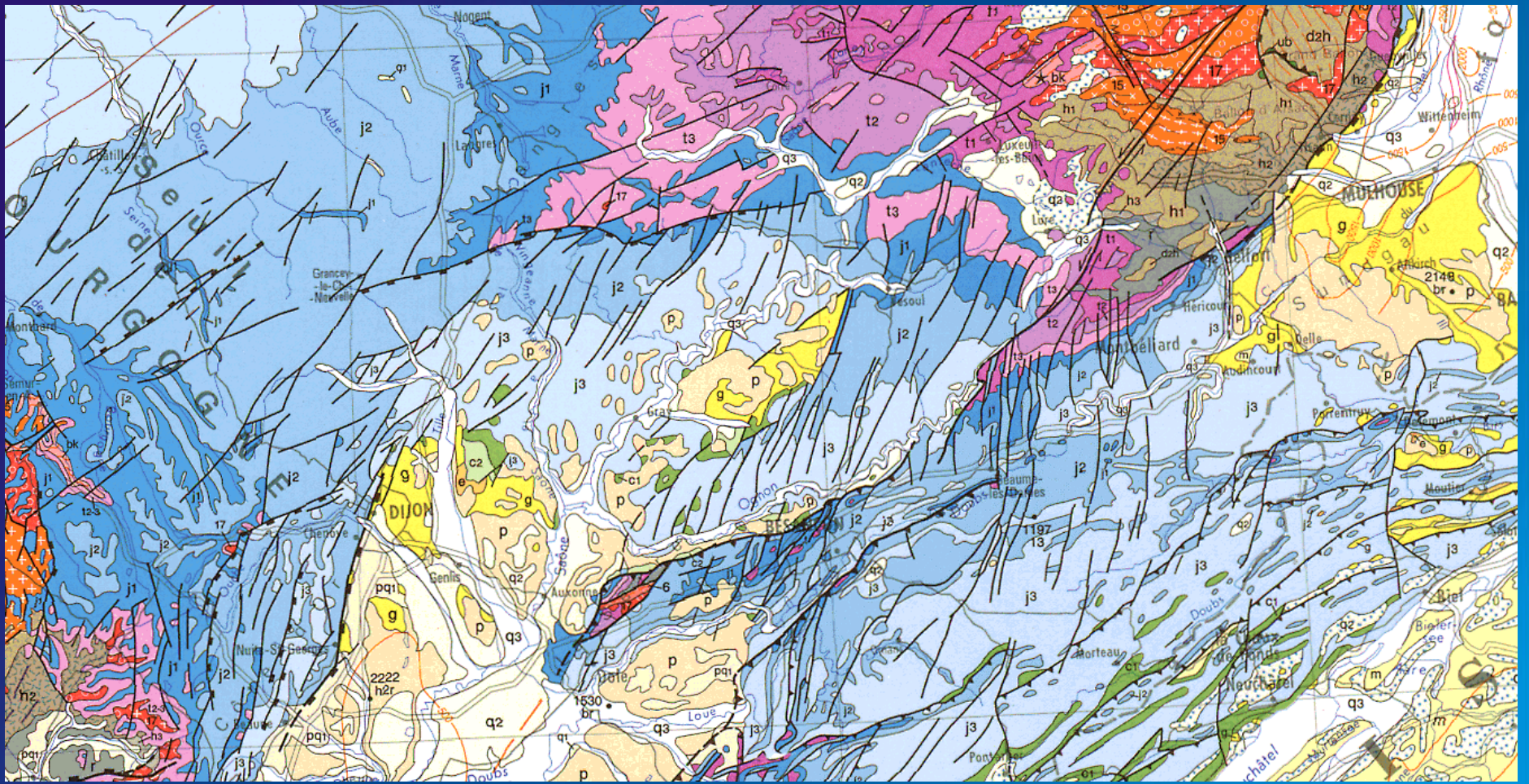


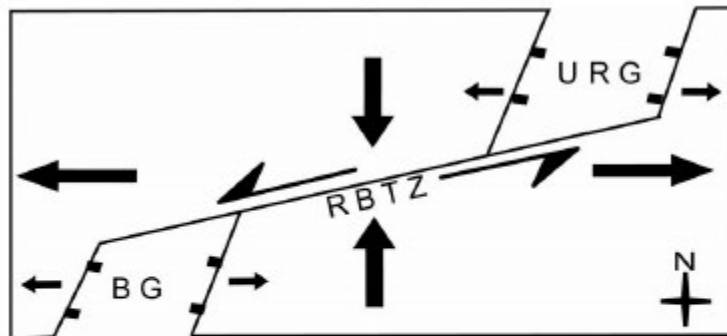
Failles normales et orientations des paléocontraintes à l'Oligocène dans les plateaux du Jura externe et le bassin de Laufen. Coordonnées des sites et caractéristiques des tenseurs : cf. Lacombe (1992). Projection de Schmidt, hémisphère inférieure. Traces cyclographiques et points avec flèches : plans de failles et stries correspondantes (toutes normales). Étoiles à 5, 4 et 3 branches : axes calculés σ_1 , σ_2 et σ_3 . Flèches noires : directions d'extension.

Normal faults and palaeostress orientations during the Oligocene. Diagrams (lower hemisphere, equal area projection) with faults as thin curves and slickenside lineations as dots with arrows (normal). Palaeostress directions as empty star with 5 points (σ_1), 4 points (σ_2), or 3 points (σ_3); Direction of extension as black arrows. For site locations and characteristics of stress tensors, see Lacombe (1992).

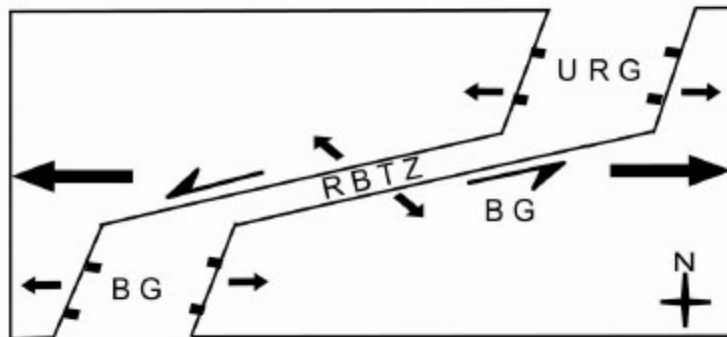
(Lacombe et Angelier, 1993)

Un style structural largement influencé par l'extension oligocène et la Zone Transformante Rhin -Saône

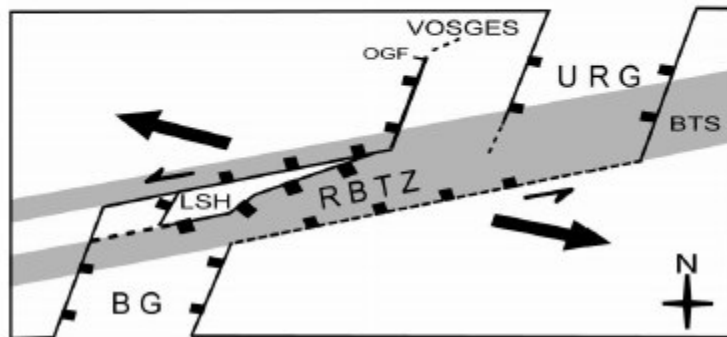




a)



b)



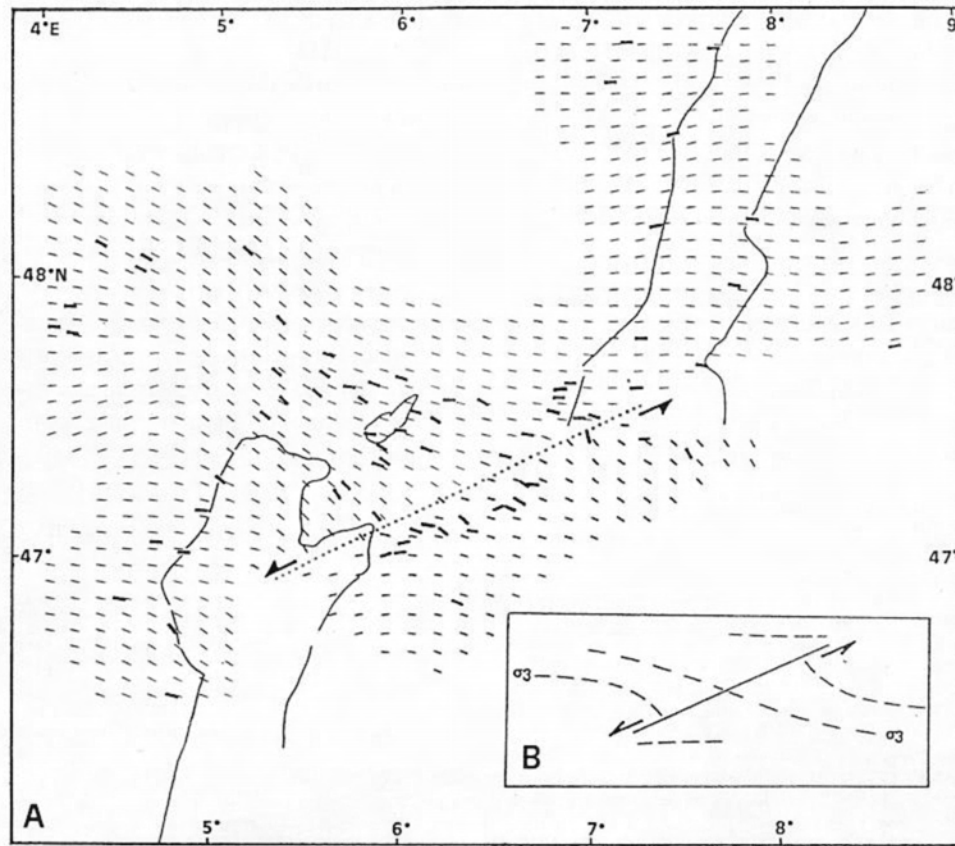
c)

Bergerat, 1977

Lacombe et al., 1993

Madritsch, 2008

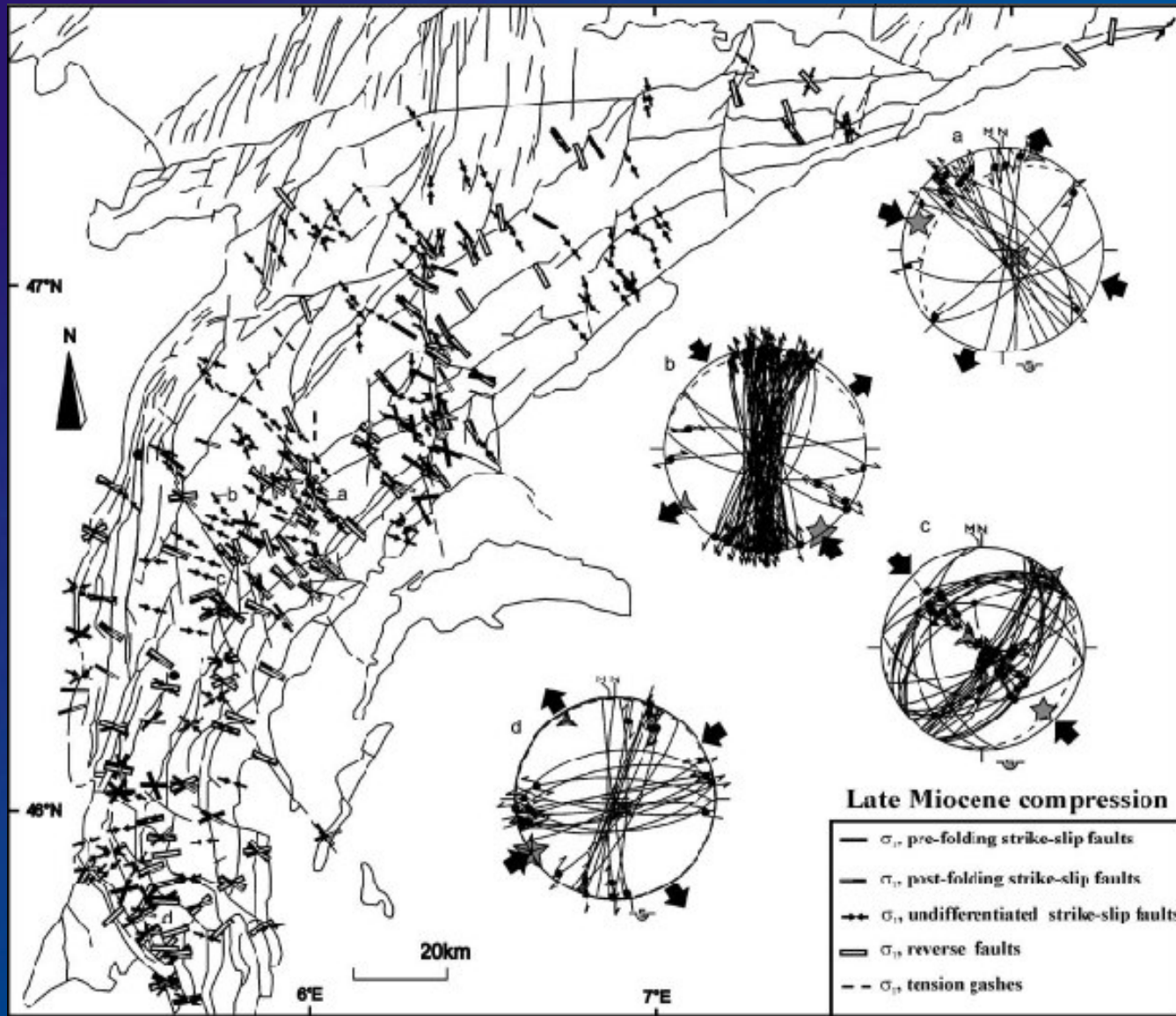
(Madritsch et al., 2008)



Trajectoires de la contrainte principale minimale σ_3 oligocène dans la Zone Transformante Rhin-Saône : résultats et interprétation. A : trajectoires de σ_3 interpolées à partir des données de terrain (tiretés épais), à l'aide du programme « lissage » (Lee et Angelier, 1993). Pour tenir compte de la discontinuité du champ de contraintes, les trajectoires ont été tracées séparément dans la partie nord (plateaux de Haute-Saône) et dans la partie sud (Jura des plateaux). Les pointillés schématisent la zone de discontinuité dont la réactivation en décrochement sénestre est susceptible d'engendrer les perturbations observées. Noter la similarité des trajectoires interpolées avec le modèle (B). B : trajectoires de σ_3 à proximité d'un accident réactivé en décrochement sénestre, d'après les observations de terrain et les modélisations numériques (Xiaohan, 1983).

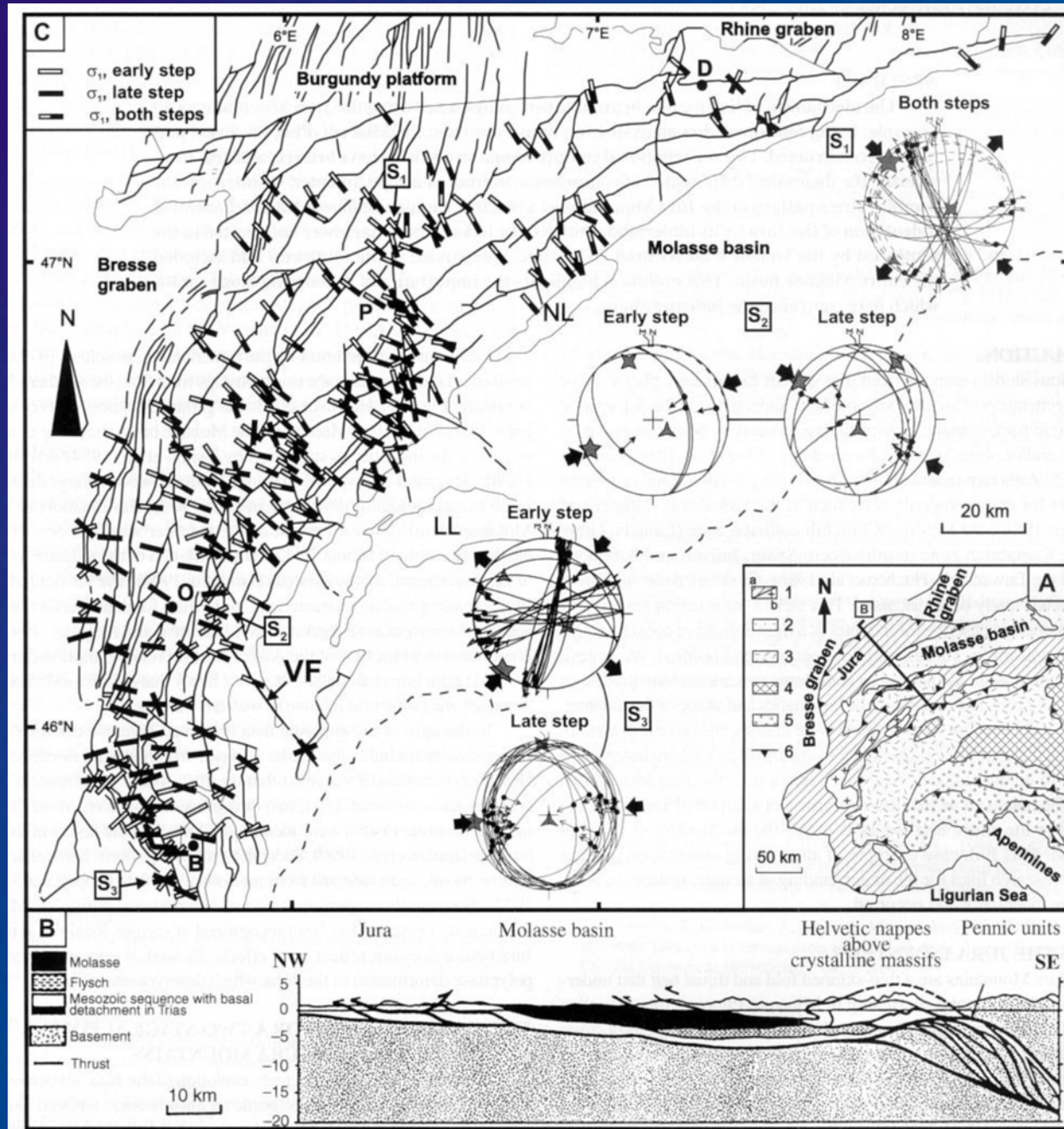
σ_3 trajectories related to the Oligocene extension in the Rhine-Saône transform zone. A. Actual σ_3 trajectories: the heavy dashes represent local σ_3 orientations determined from geologic stress indicators, the light ones the averaged trajectories (Lee and Angelier, 1993). To take into account the discontinuity of the stress field, the trajectories were drawn separately for the northern and the southern parts. Points represent the supposed basement discontinuity at the origin of the stress perturbations. B: σ_3 trajectories in the vicinity of a preexisting fracture reactivated as a sinistral strike-slip fault, from field observations and numerical modelling (Xiaohan, 1983).

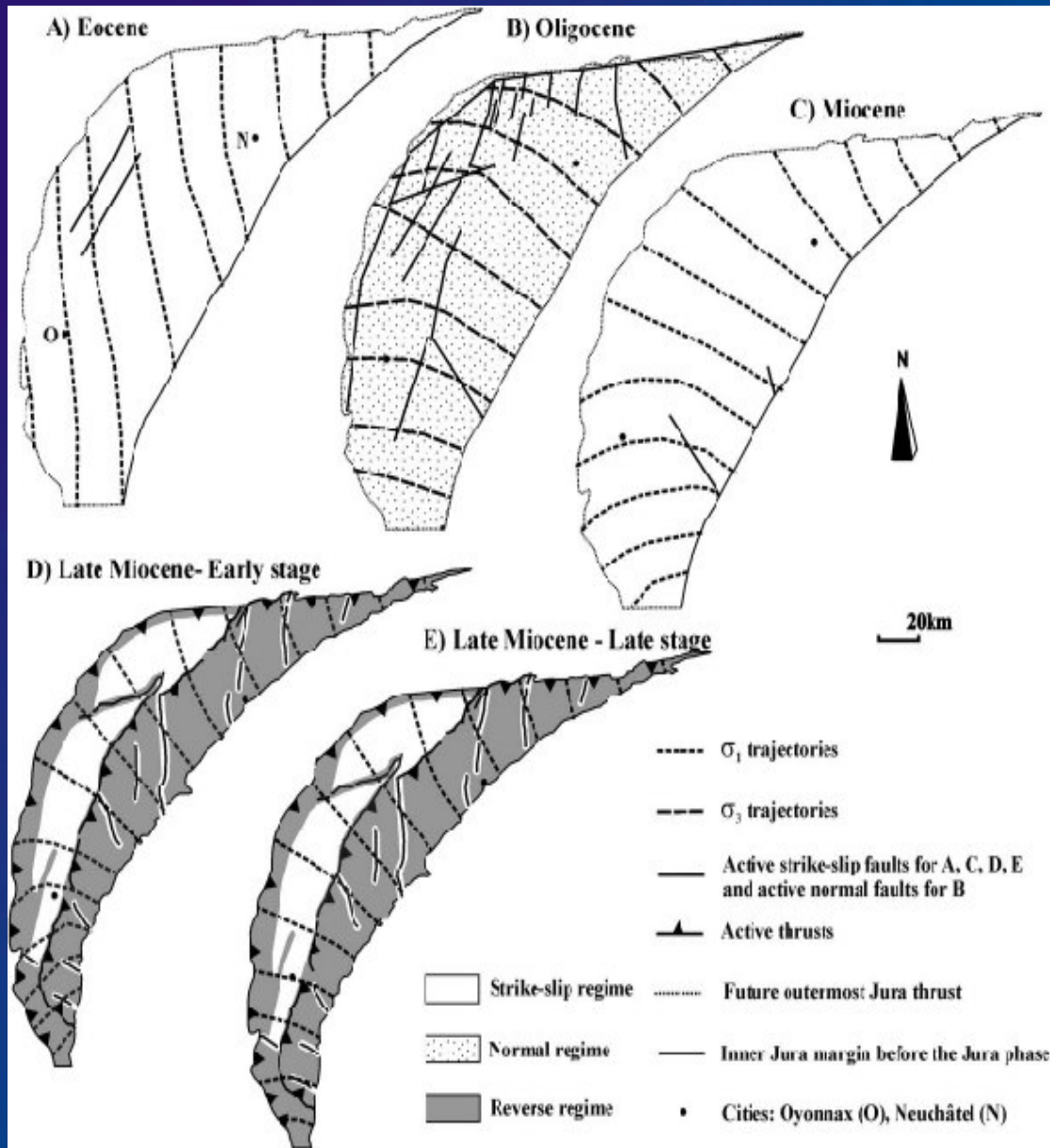
(Lacombe et Angelier,
1993)



(Homberg et al. 2002)

(Homberg et al., 1999)





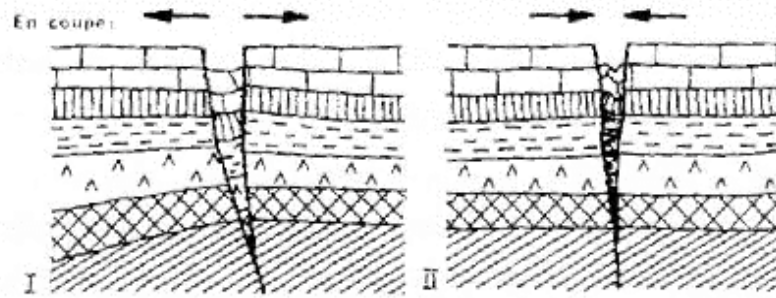
(Homberg et al. 2002)

**Rôle de l'héritage structural
dans la tectogenèse du Jura :
rôle des failles de socle pré-existantes
et des épisodes tectoniques antérieurs**

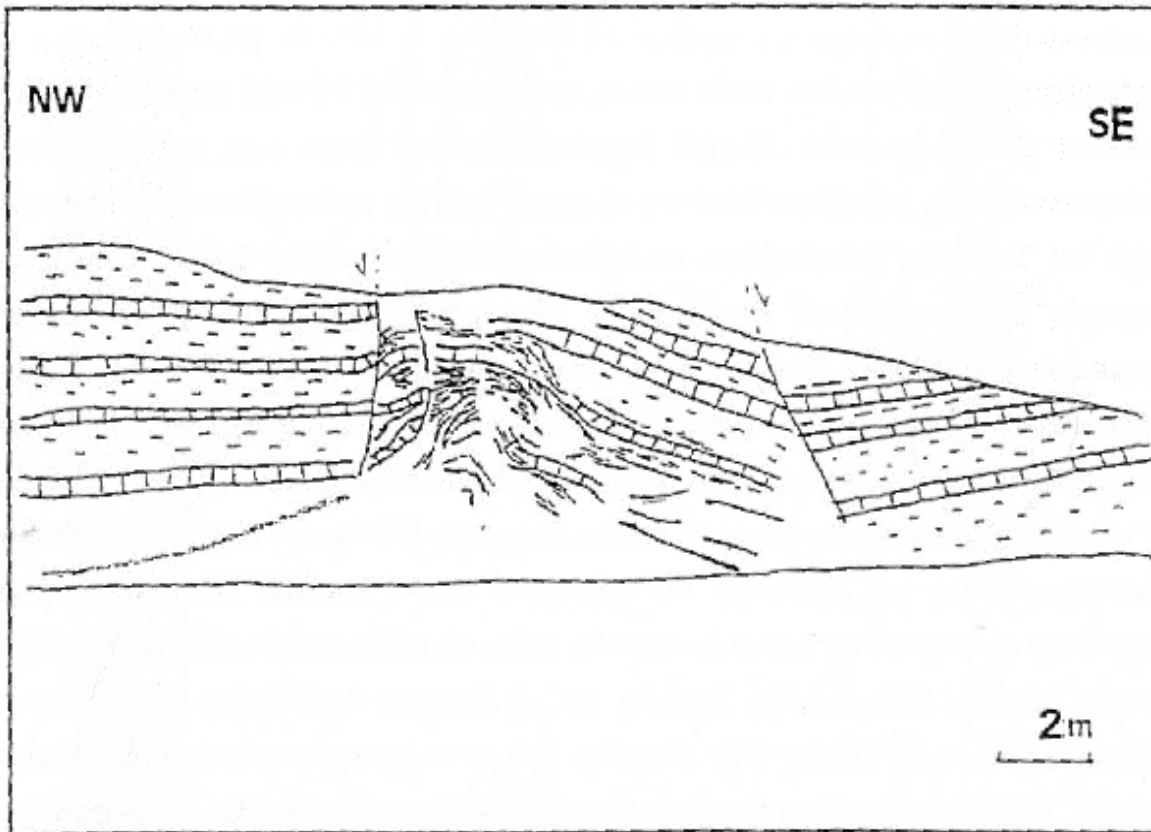




A

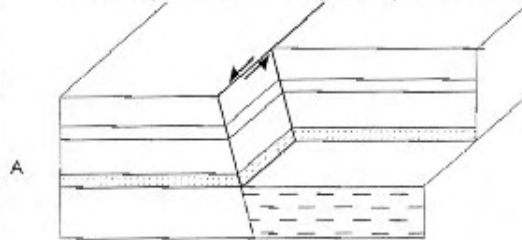


B

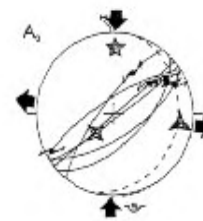


Pincée de l'Euthe

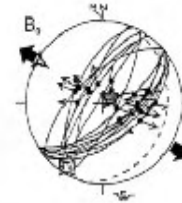
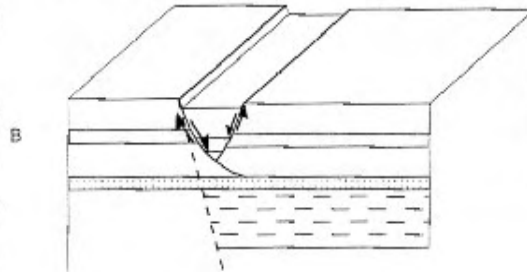
Eocène: initiation d'un décrochement superficiel
senestre à proximité des failles paléozoïques de socle



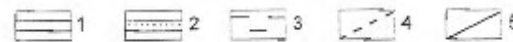
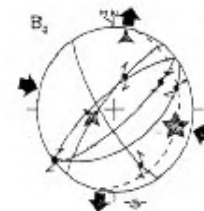
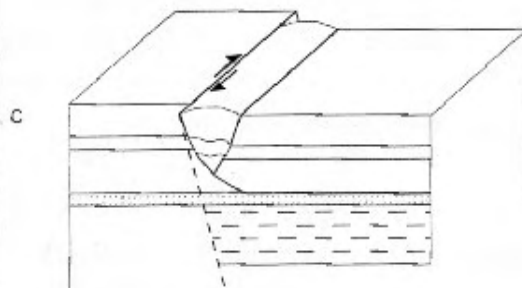
Failles mineures



Initiation d'une faille normale à proximité des failles paléozoïques
de socle avec réactivation des accidents éocènes



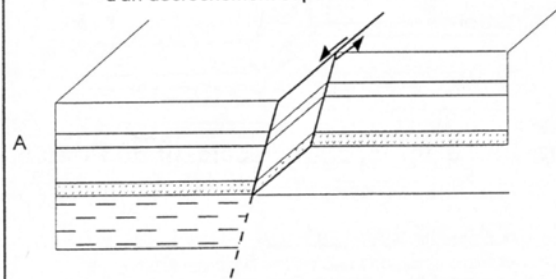
Mic-Pliocène
- décollement de la couverture
- réactivation de la faille normale oligocène
en décrochement dextre transpressif
- serrage de l'ancien fossé



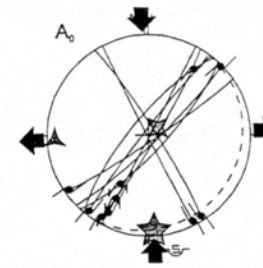
(Homberg, thèse, 1997)

Frontière Jura interne-Jura externe

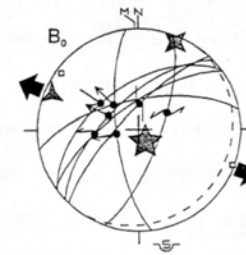
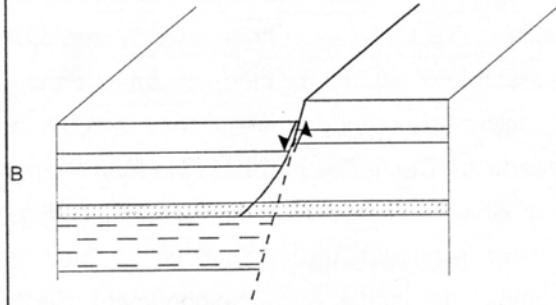
Eocène:
localisation par les failles profondes paléozoïques
d'un décrochement superficiel senestre



Failles mineures

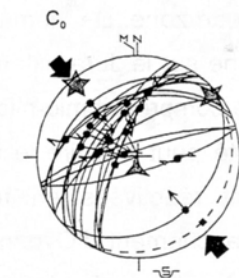
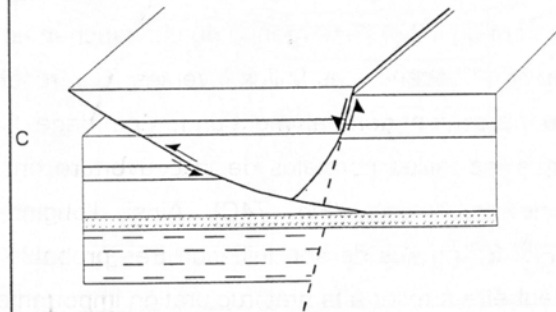


Oligocène:
localisation par les failles profondes paléozoïques
et/ou par la stucturation éocène d'une faille normale superficielle

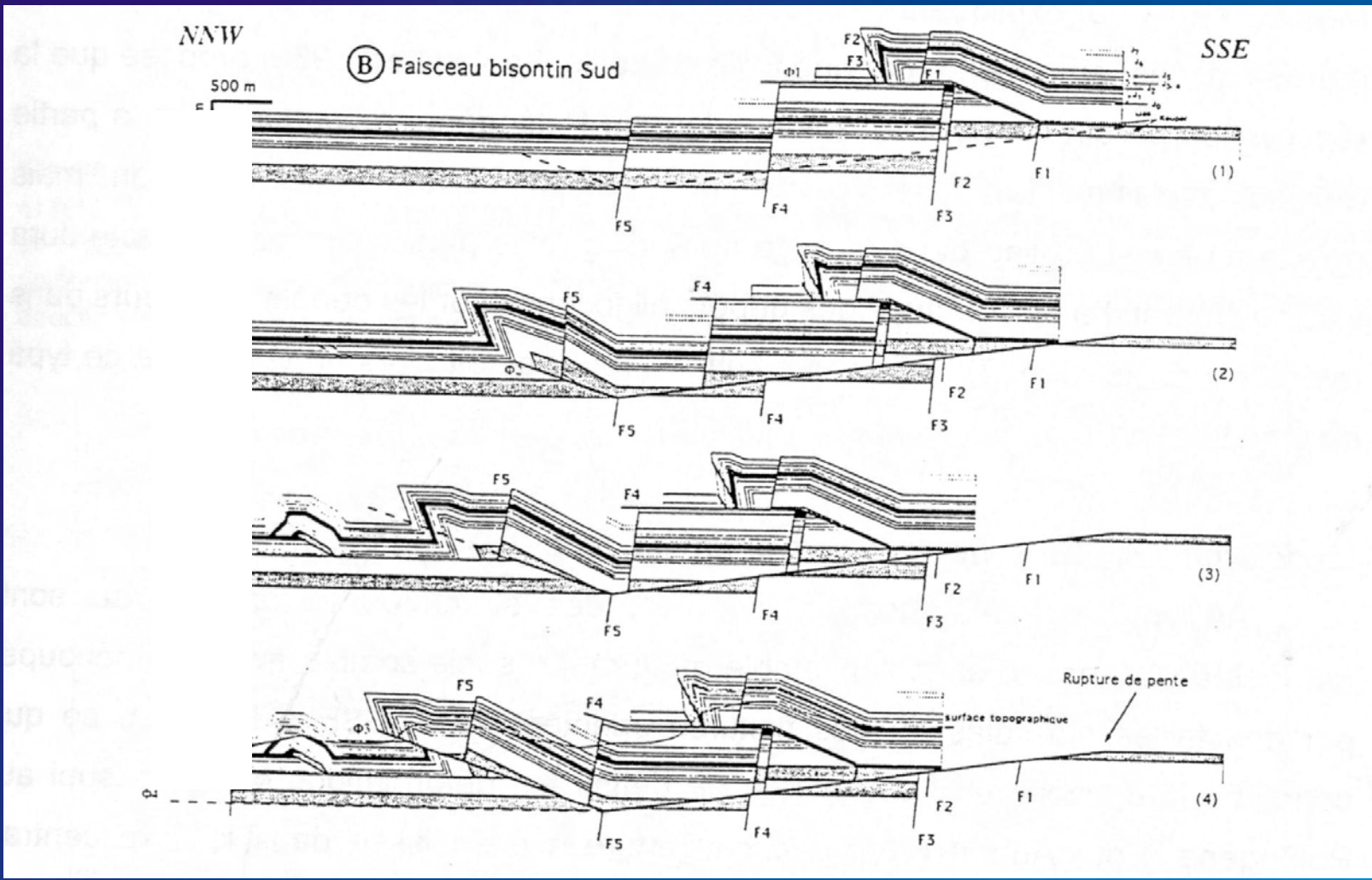


Mio-Pliocène

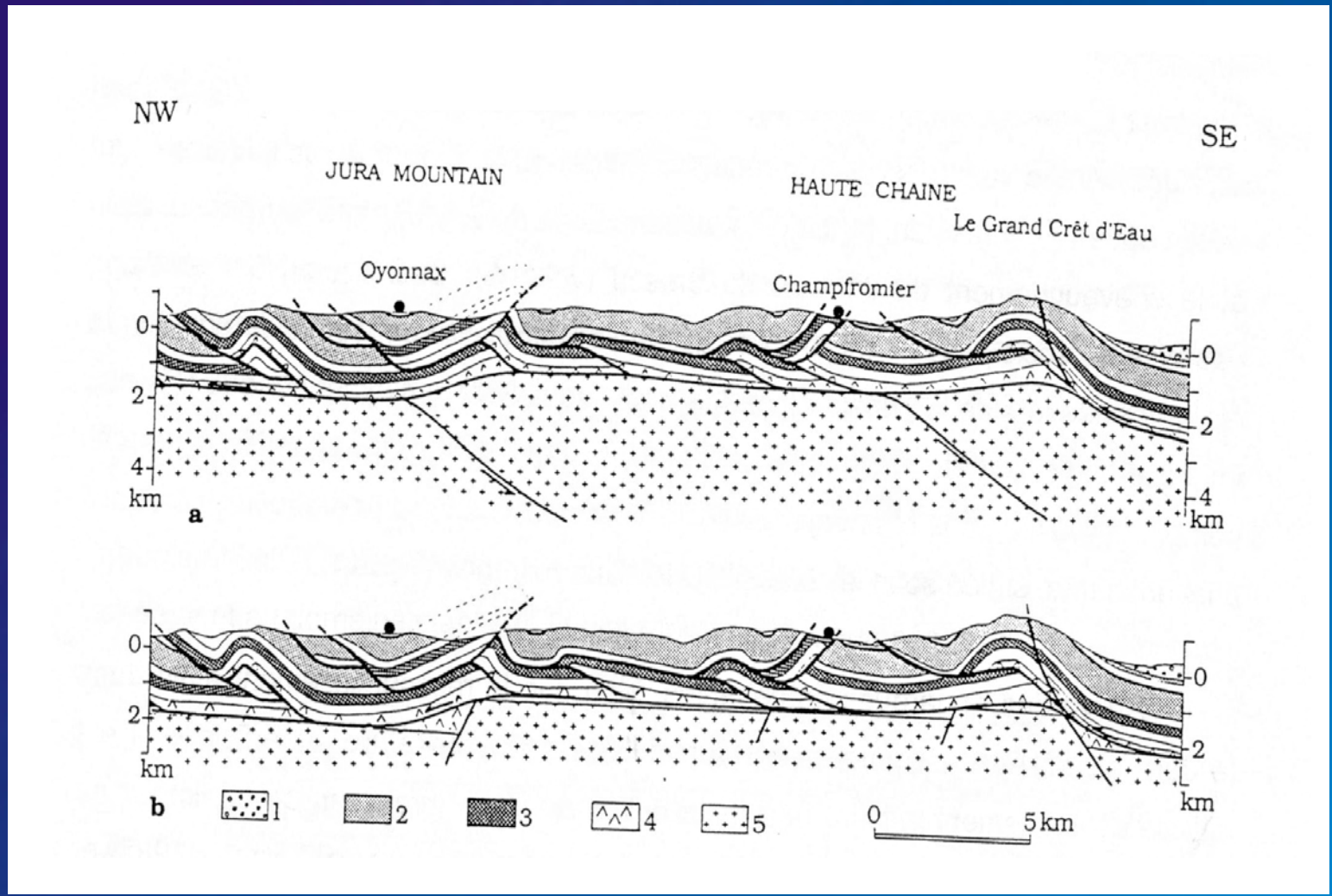
- décollement de la couverture
- localisation d'une rampe de chevauchement par les failles paléozoïques du socle
- réactivation locale des failles normales oligocènes en rétrochevauchements



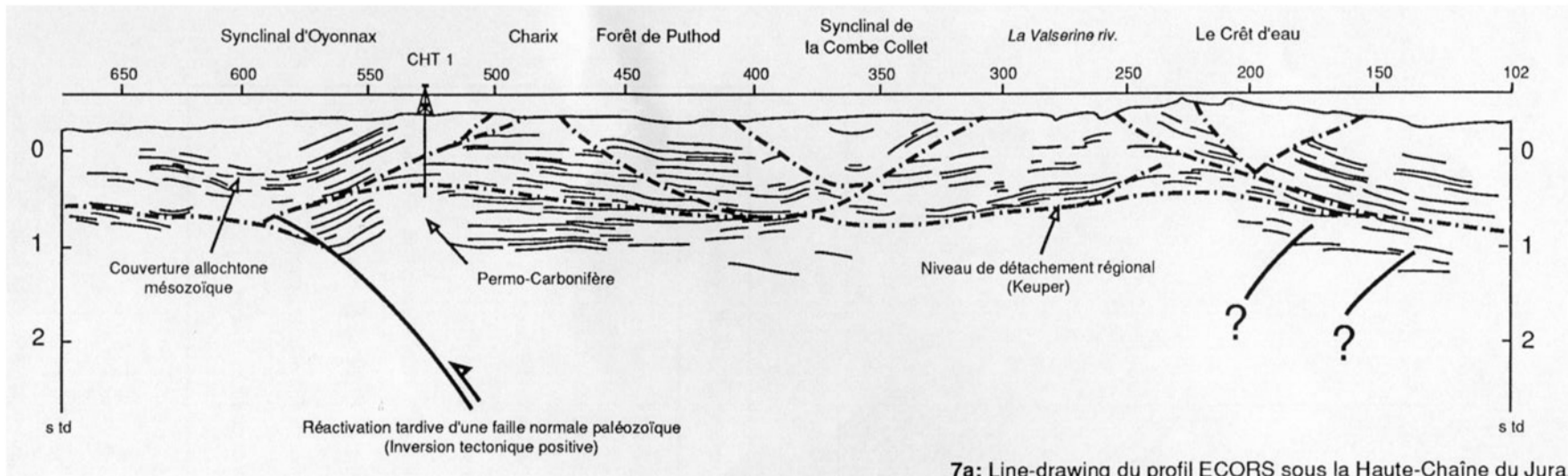
(Homberg, thèse, 1997)



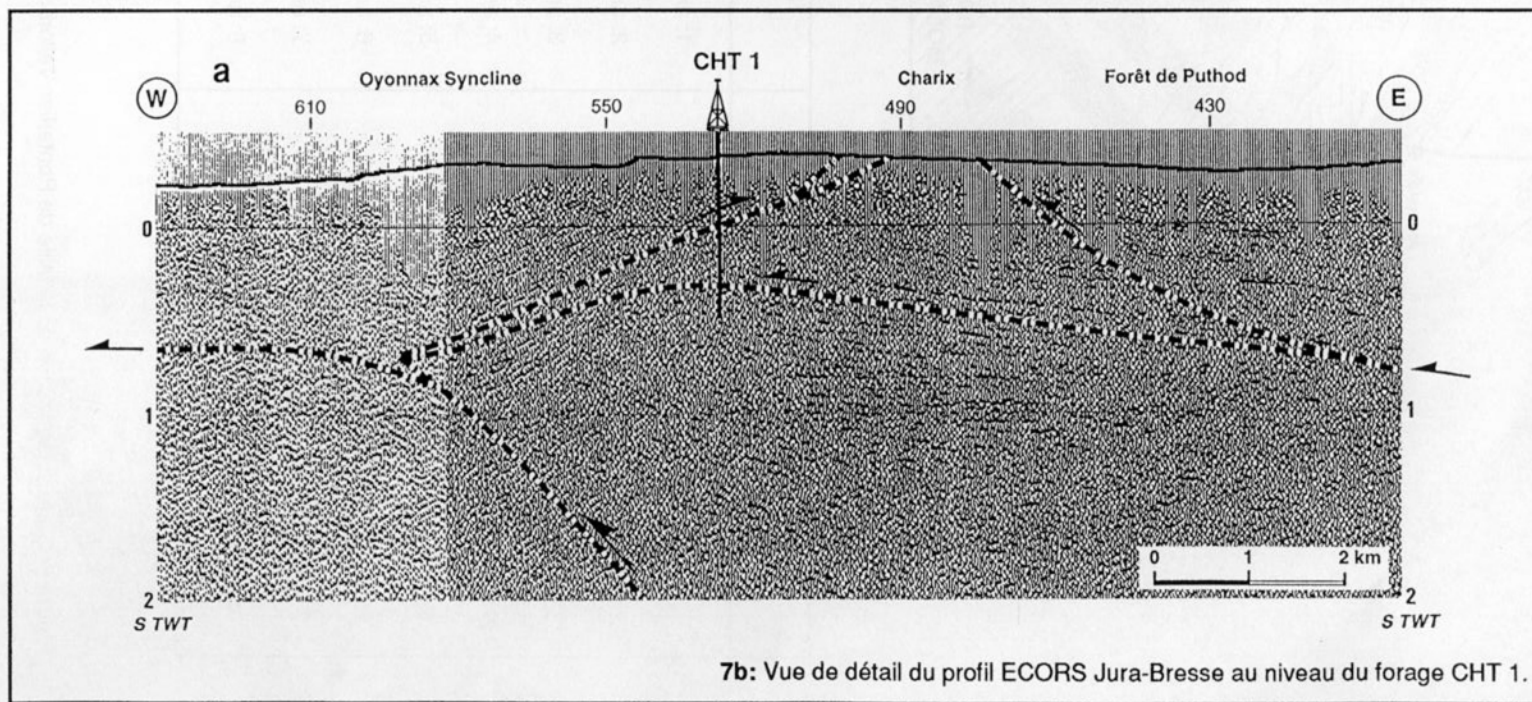
(Martin et Mercier, 1996)



(Guellec et al., 1990)



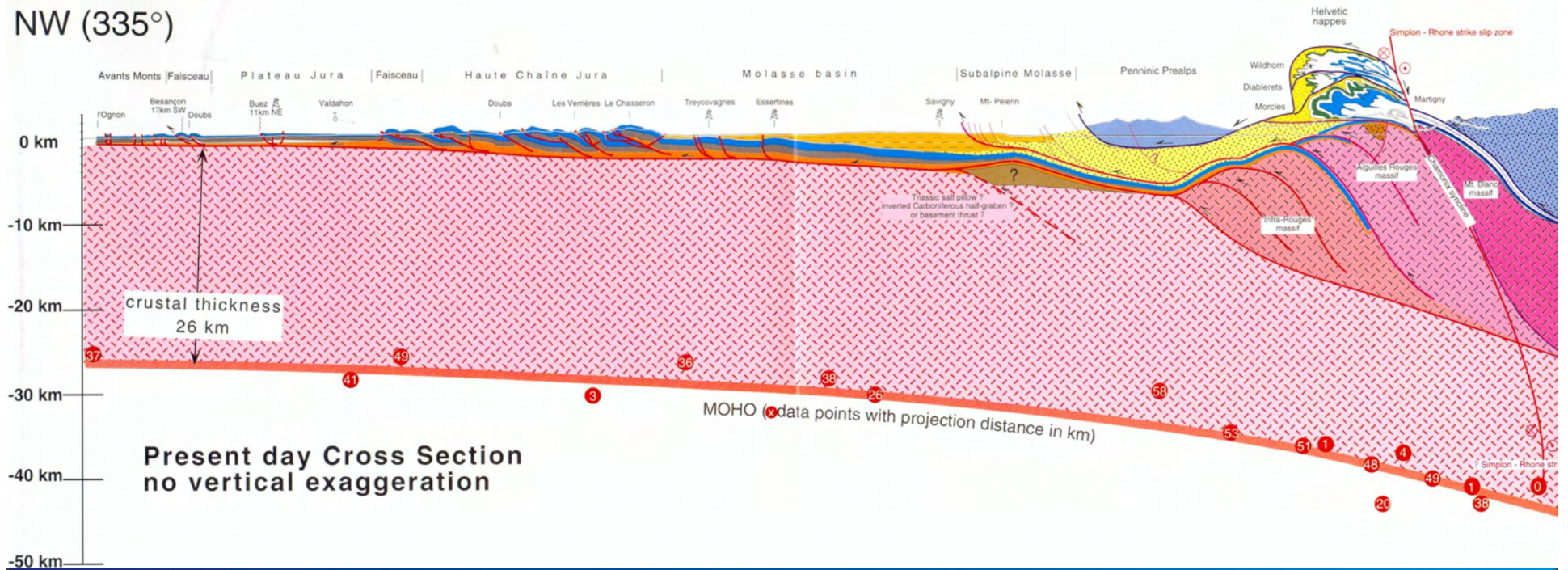
7a: Line-drawing du profil ECORS sous la Haute-Chaîne du Jura



7b: Vue de détail du profil ECORS Jura-Bresse au niveau du forage CHT 1.

**Modèles de formation
de la chaîne arquée du Jura**

NW (335°)



(Burkhard et Sommaruga, 1998)

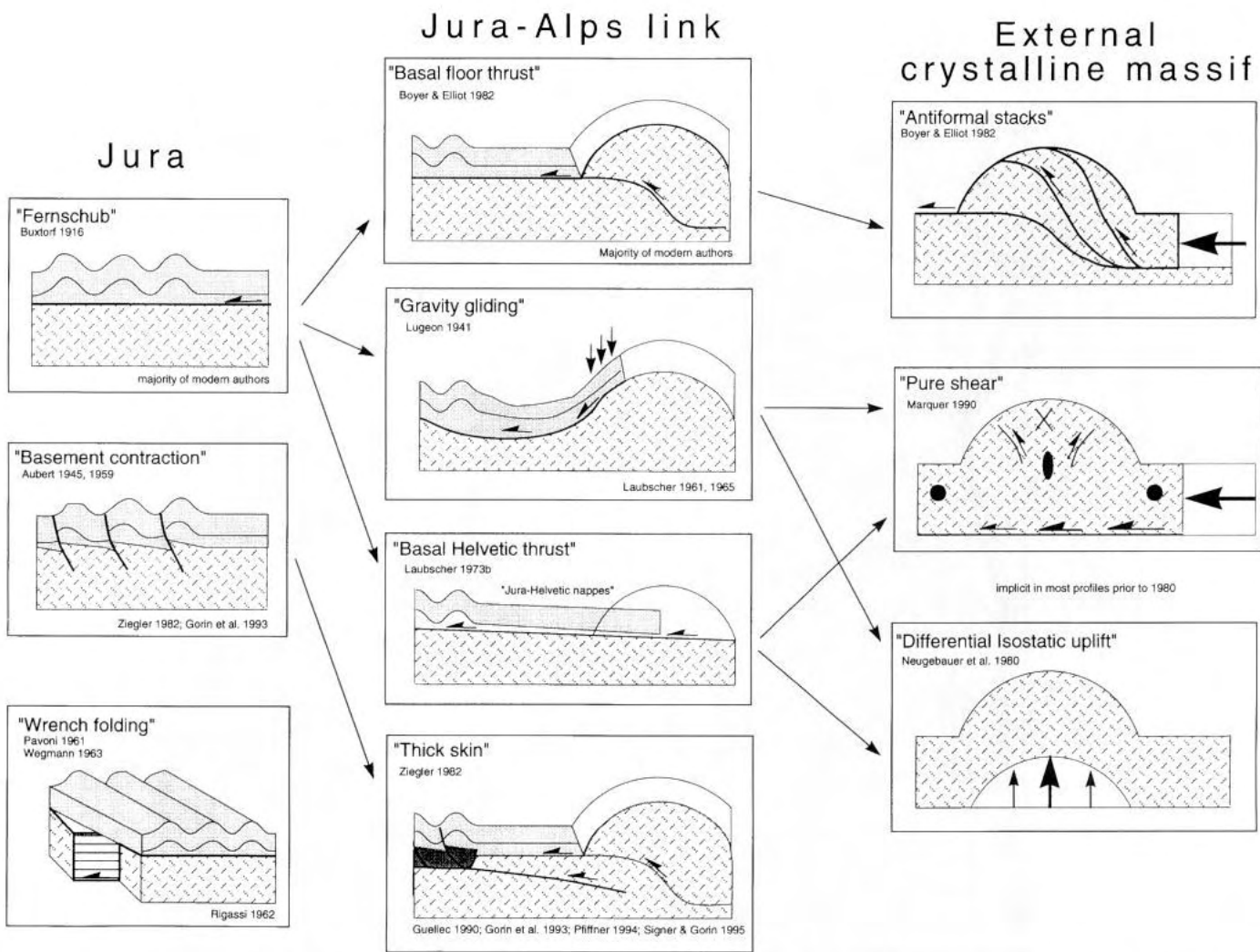
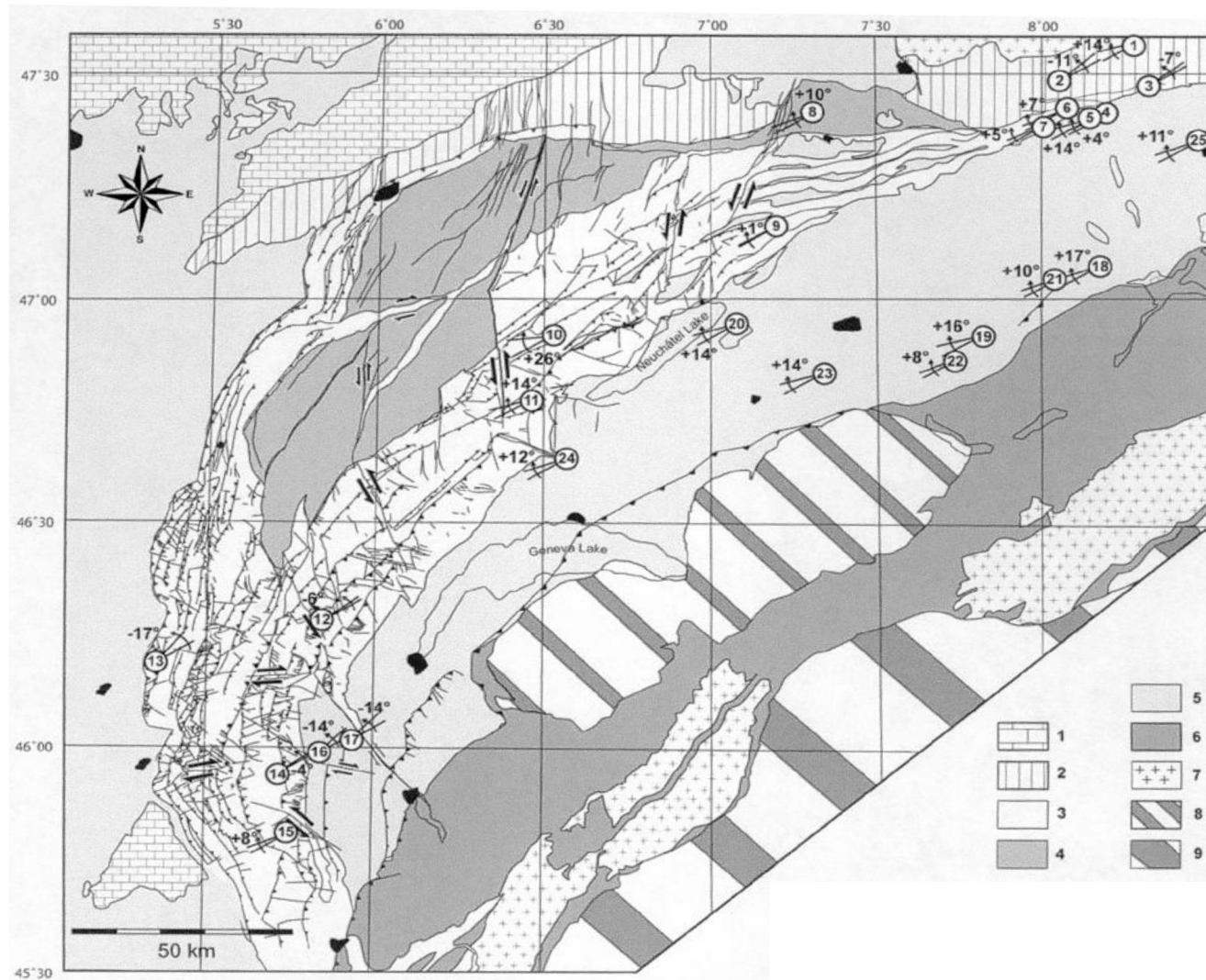
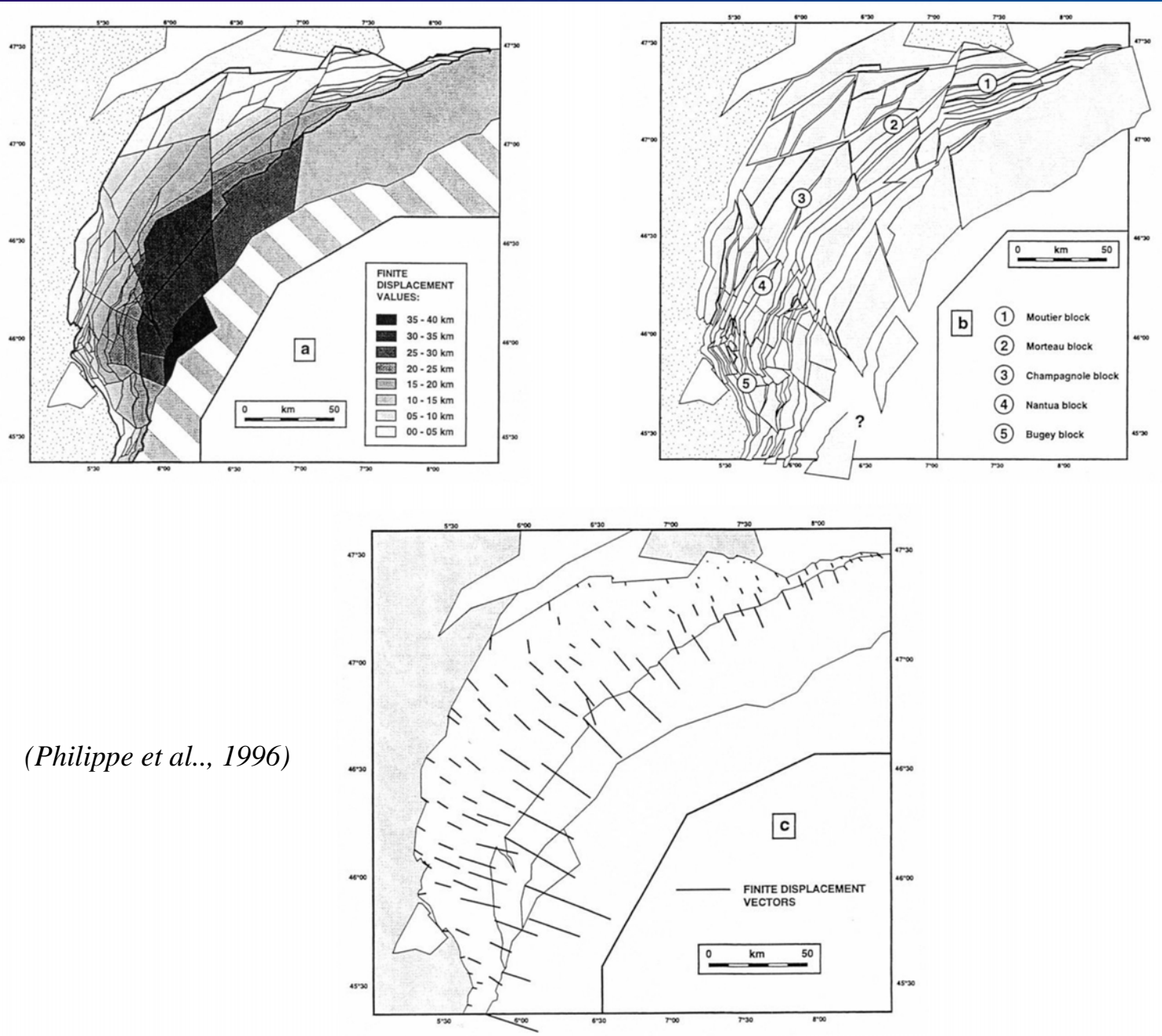


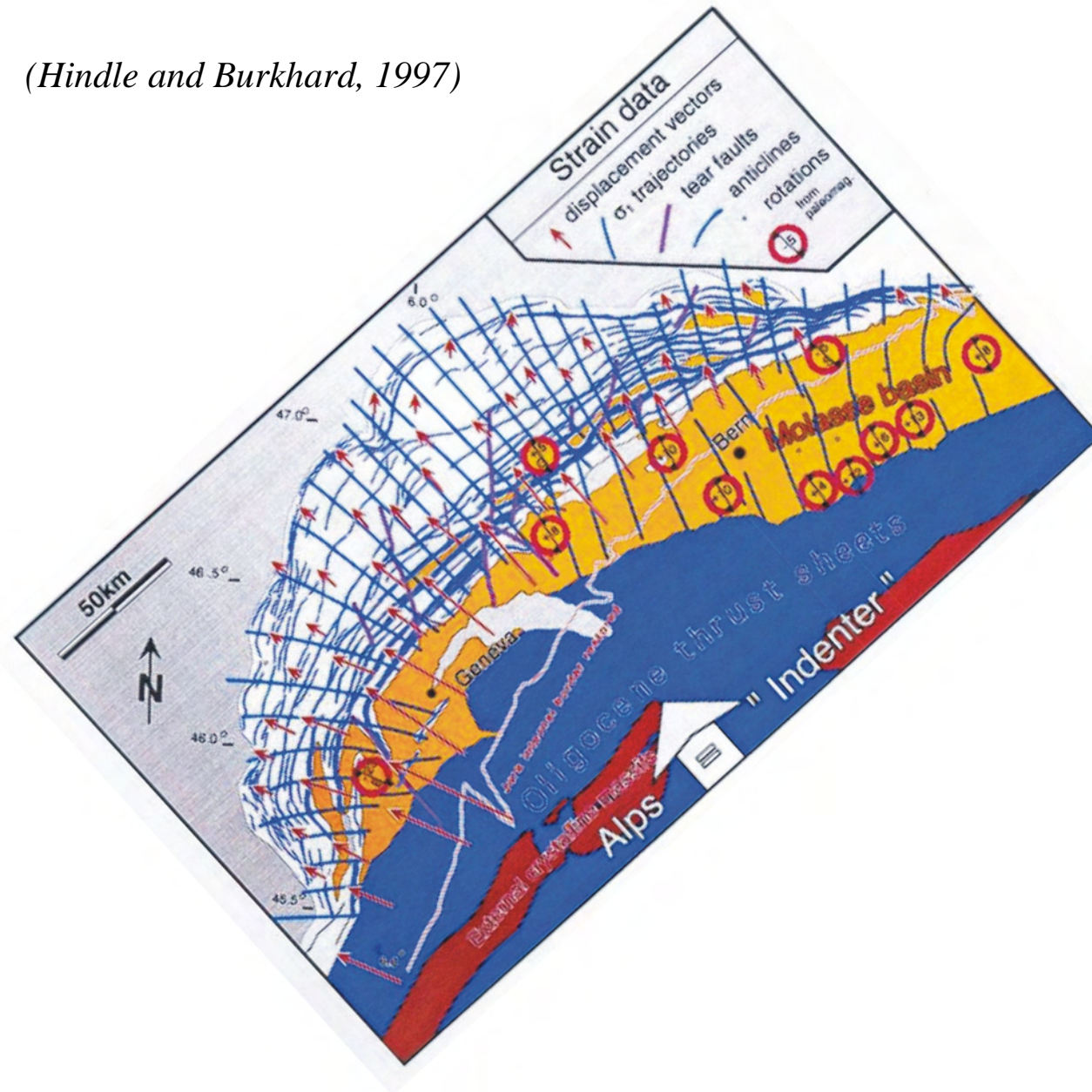
Fig. 4. Conceptual models on the formation of the Jura fold-and-thrust belt and its links to the Alps (external crystalline massifs). Modified from Burkhard (1990).

(Sommaruga, 1997)

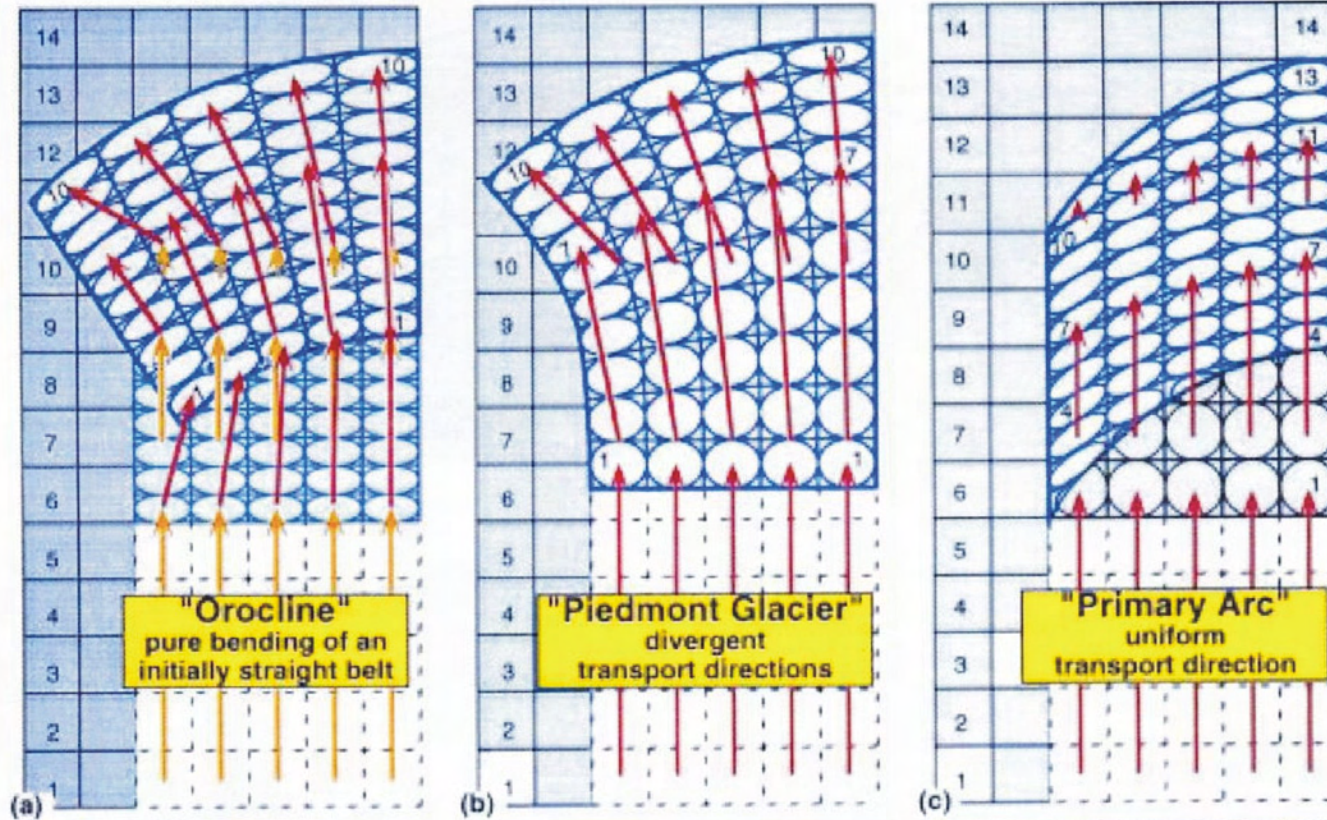




(Hindle and Burkhard, 1997)



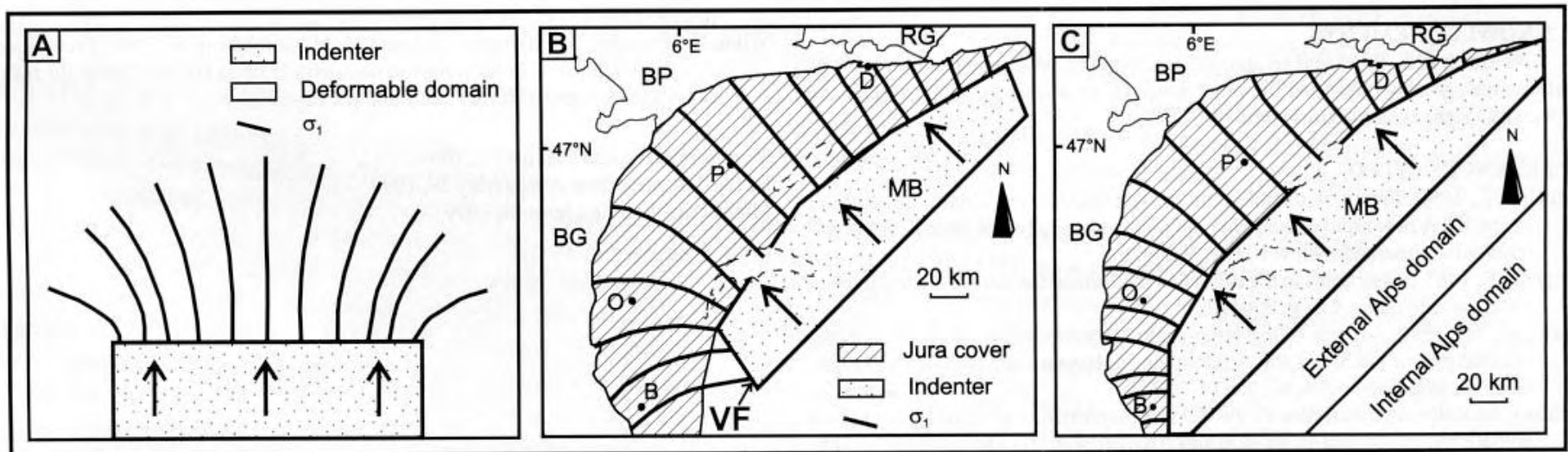
(Hindle and Burkhard, 1997)



- Pure shear shortening followed by pure bending.
- Large arc-parallel extension on the outer side and compression on the inner side.
- Passive rotations of limbs

- Forelandward increase in arc-parallel extension.
- Along transport lines, strain evolves from extensional at the rear to compressional at the front
- As in orocline, large passive rotations of limbs

- Advance of an arcuate indenter at the rear;
- Divergent strain trajectories.
- Transpressional wrench deformation along limbs

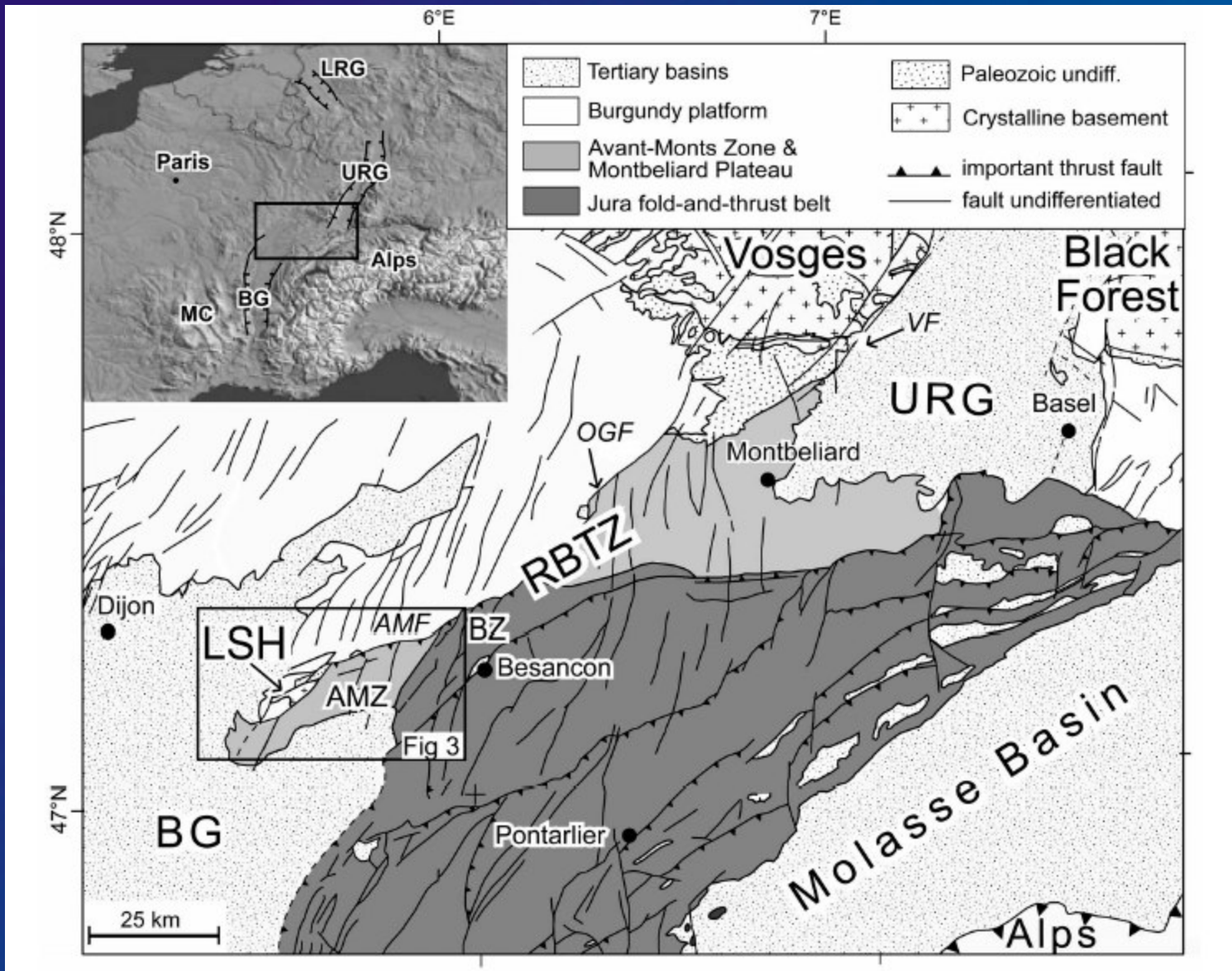


(Homberg et al., 1999)

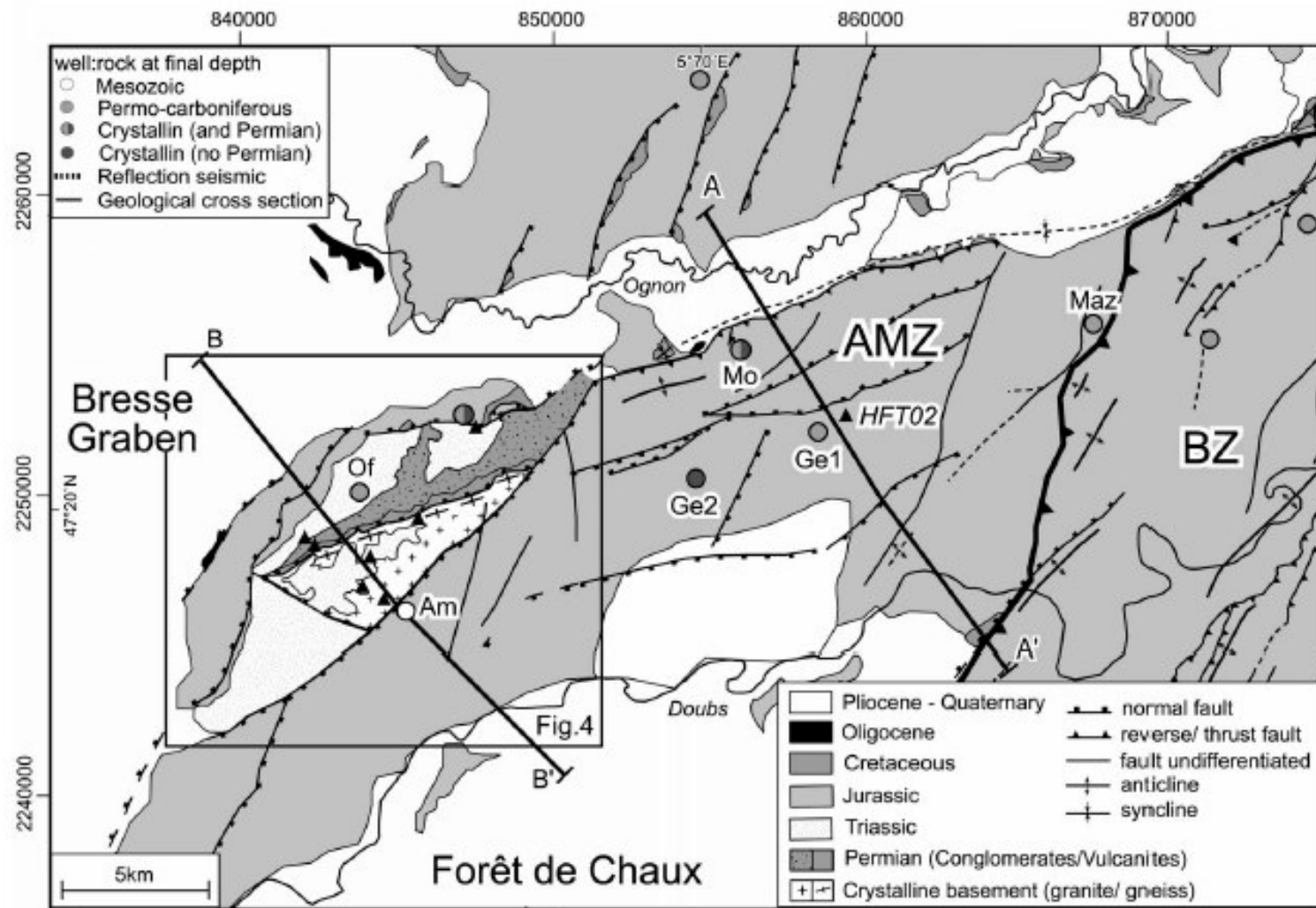
Fin



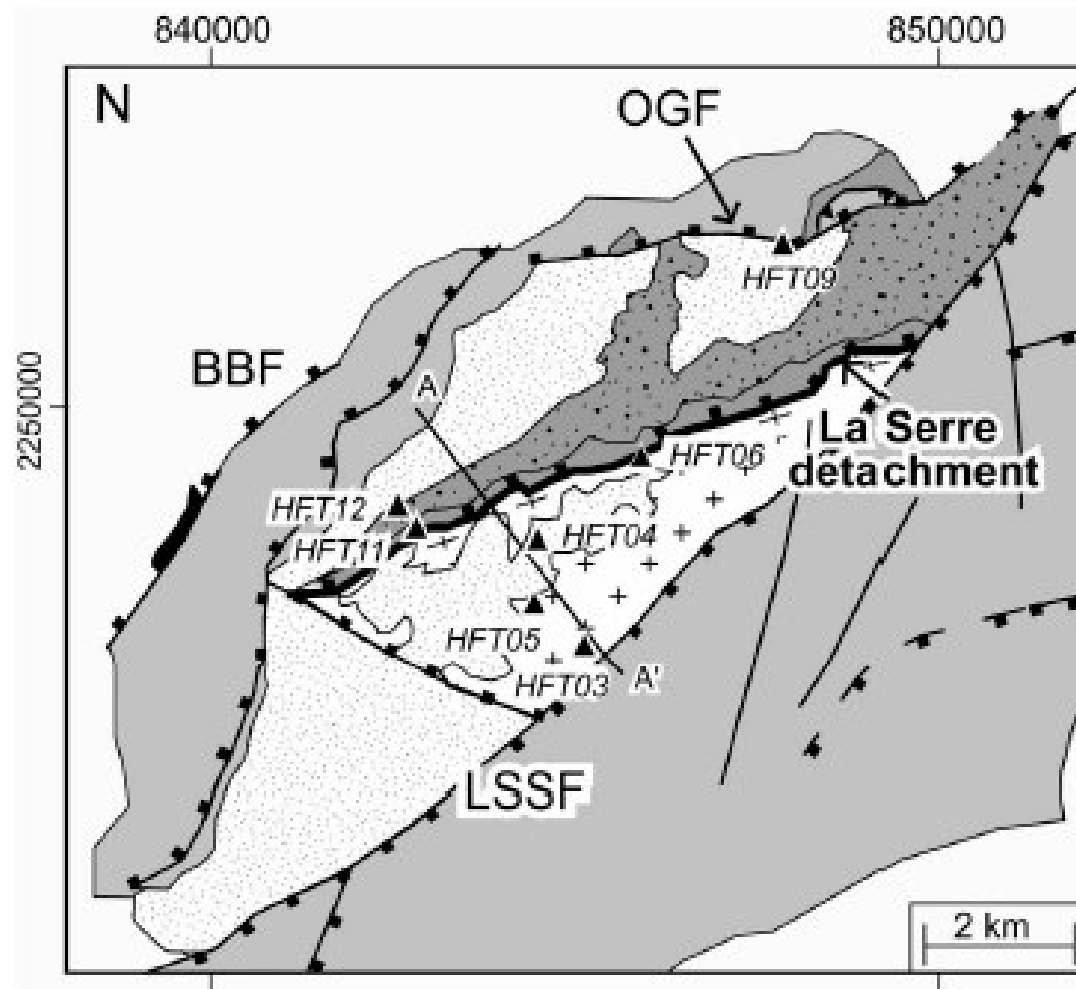
Horst de la Serre et tectonique des avant-monts



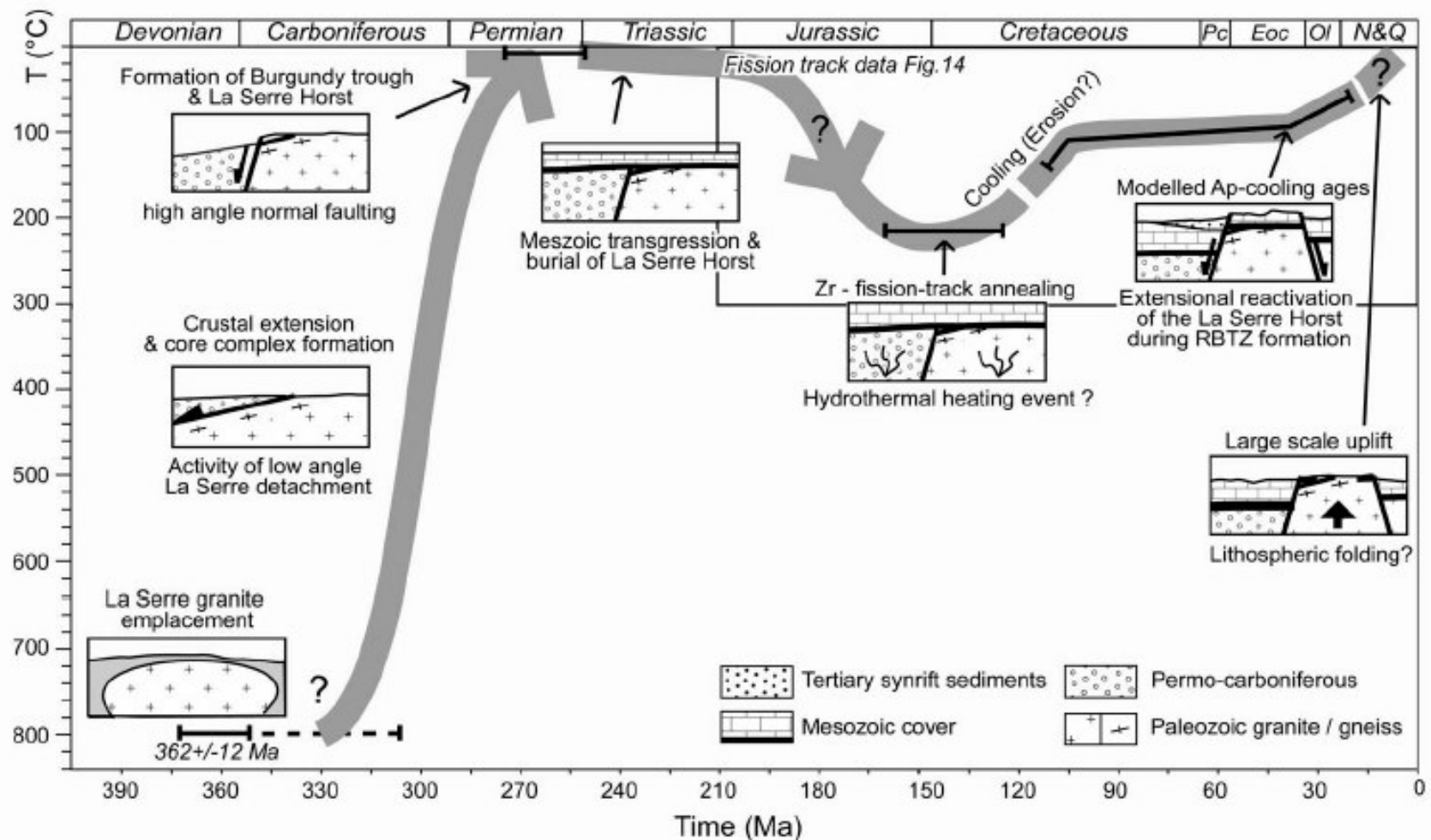
(Madritsch, thèse, 2008)



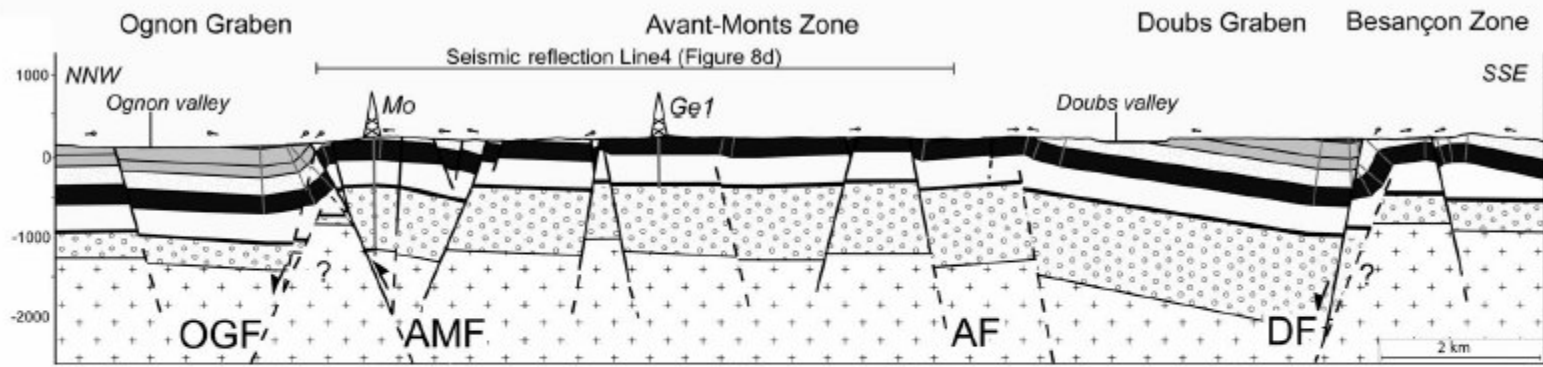
(Madritsch, thèse, 2008)



(Madritsch, thèse, 2008)



(Madritsch, thèse, 2008)

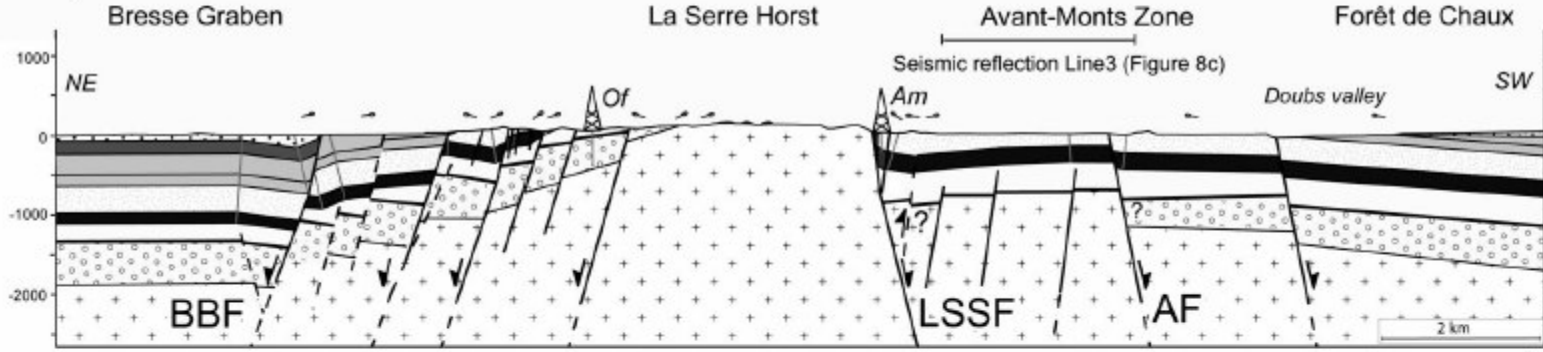


A A'

854610 865340

2259390 2243220

a)

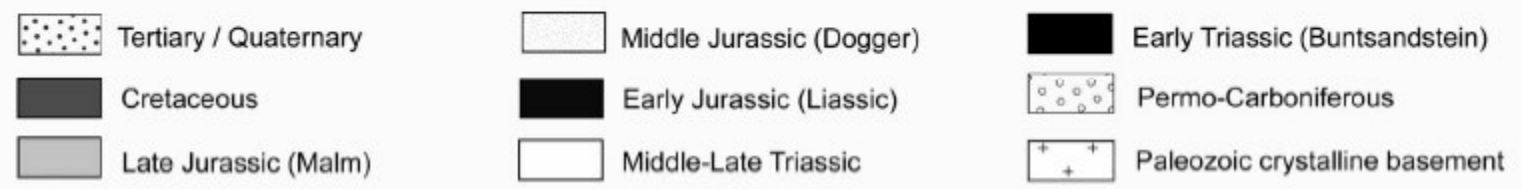


B B'

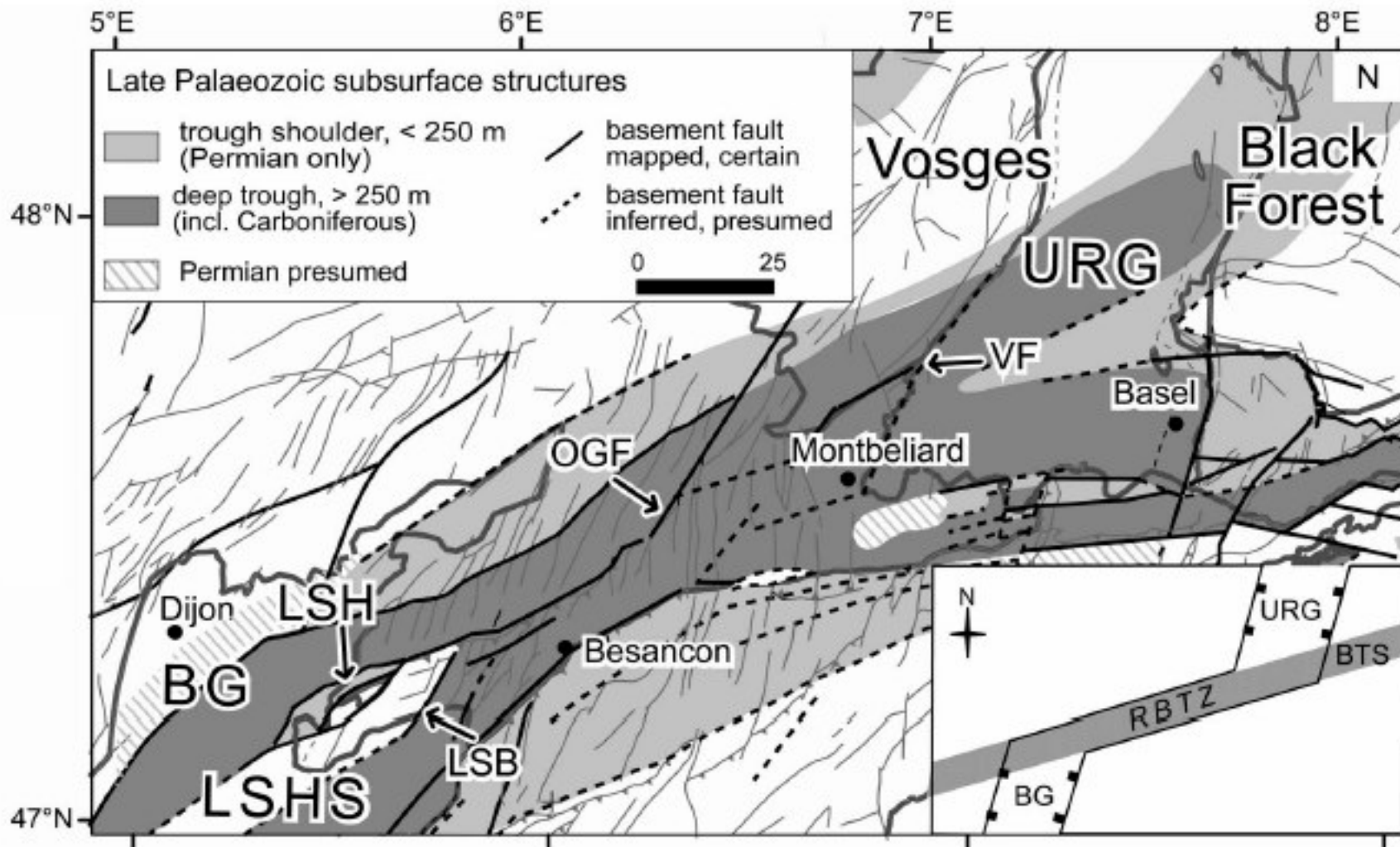
837990 850010

2254290 2240520

b)



(Madritsch, thèse, 2008)



(Madritsch, thèse, 2008)