

## Évolution tectonique du Jura externe au Cénozoïque et perturbations de contraintes dans la Zone Transformante Rhin-Saône

Olivier LACOMBE et Jacques ANGELIER

**Résumé** – L'analyse des structures cassantes dans les plateaux du Jura externe et le Sud du fossé rhénan a permis la reconstitution des champs de contraintes qui se sont succédé depuis la fin du Mésozoïque. Plus particulièrement, une extension E-W à NW-SE, probablement liée à l'épisode de rifting oligocène, a été caractérisée ; la distribution hétérogène des orientations de  $\sigma_3$  conforte le modèle de perturbations de contraintes associées à la cinématique oligocène en décrochement extensif sénestre de la Zone Transformante Rhin-Saône.

### Cenozoic tectonic evolution of the external Jura and stress perturbations in the Rhine-Saône transform zone

**Abstract** – The tectonic analysis of brittle structures in the plateaux of the external Jura enabled us to reconstruct the successive palaeostress fields since the late Mesozoic. In particular, an E-W to NW-SE extension, probably related to the major Oligocene rifting event, was clearly identified. The heterogeneous distribution of related  $\sigma_3$  orientations confirms the model of stress perturbations associated with the Oligocene kinematics of the Rhine-Saône Transform Zone.

**Abridged English Version** – INTRODUCTION. – This Note reports the results of recent tectonic analyses and palaeostress reconstructions in the southern part of the Rhine-Saône transform zone. These analyses were carried out in order better to constrain the model of stress perturbations associated with the Oligocene transform kinematics of the area (Lacombe *et al.*, 1993).

I. STRUCTURAL FRAMEWORK: THE PLATEAUX OF THE EXTERNAL JURA. – During the Mio-Pliocene tectogenesis of the Jura, the Mesozoic sedimentary cover was detached above a Triassic evaporite decollement level, and moved towards the NW, overthrusting the Haute-Saône plateaux and the Rhine and Saône grabens (e. g., Lienhardt, 1962; Chauve *et al.*, 1980). The plateaux of the external Jura remained nearly undeformed, and consequently provide good conditions for analysing brittle structures related to pre-Miocene tectonic events (*fig. 1*). Because horizontal rotation of sedimentary formations is negligible as indicated by palaeomagnetism (e. g., Gehring *et al.*, 1991), and considering the small amount of displacement of the external Jura, the reconstructed palaeostress orientations reliably reflect the pre-Miocene stress patterns.

II. TECTONIC ANALYSES IN THE PLATEAUX OF THE EXTERNAL JURA AND THE SOUTH OF THE RHINEGRABEN. – Striated minor faults, tension gashes and stylolites were systematically measured, and stress tensor calculation was carried out by using Angelier's (1984) inverse methods.

*a. In the Quingey plateau*, submeridian normal faults associated with a N 080° extension, probably Oligocene in age, were clearly identified. A N 130° compression marked mainly by strike-slip fault systems postdates the Oligocene extension.

*b. In the Ornans-Montrond plateau*, numerous normal faults allowed reconstruction of an E-W to N 110-130° extension (*fig. 2*). Strike-slip fault systems were also measured, indicating a N-S and a N 130° compression. The large extent of normal faulting on the eastern border of

Note présentée par Jean AUBOUIN.

the Bresse graben suggests a probable Oligocene age for this event. Relative chronology criteria indicate that the Oligocene extension predates the N 130° compression and postdates the N-S compression, so that the N-S compression probably corresponds to the Eocene "pyrenean" compression previously identified in the Haute-Saône plateaux.

c. In the *Levier plateau*, predominant strike-slip fault systems allowed reconstruction of two successive compressions (N-S and N 130°), the latter being responsible for the reactivation of the Pontarlier fault and the development of the Verrieres syncline. Some normal faults were found associated with a N 110° extension.

d. In the *South of the Rhinegraben*, an Oligocene N 140° extension was identified (especially in the Laufen basin: *fig. 2*), followed by a N 160° compression.

III. SYNTHESIS : PALEOSTRESSES AND TECTONIC EVOLUTION. – During the Eocene, the jurassian platform recorded a nearly N-S compression, marked in the field by strike-slip faults (Sopena and Soulas, 1973). It was followed by an Oligocene extension, with orientations varying from N 90° to N 130-140° (from West to East), and a Mio-Pliocene N 110° to N 150° compression responsible for the tectogenesis of the Jura. A minor N-S to N 020° extension was recognized, but precise dating remained difficult.

IV. THE OLIGOCENE EXTENSION IN THE SOUTHERN BORDER OF THE RHINE-SAÔNE TRANSFORM ZONE. – Like in the Haute-Saône plateaux, the  $\sigma_3$  orientations related to the Oligocene extension are not homogeneous in the Jura plateaux (*fig. 2*); they vary progressively from E-W (close to the Saône graben) to NW-SE (south of the Rhinegraben). The E-W extension is absent in the sites where the deviated NW-SE extension is present.

The large extent of the  $\sigma_3$  deviations, their angular amplitude, and their nearly symmetric distribution with respect to the centre of the transform zone, suggest that they result from regional-scale stress perturbations associated with the reactivation of a N 060° basement fault system as a left-lateral extensional strike-slip fault. The actual stress distribution is effectively consistent with simple models of stress perturbations (*fig. 3A and 3B*).

A numerical modelling based on the "distinct element technique" was used to investigate the relationships between the stress perturbations and the Rhine-Saône transform kinematics (Dupin, 1990). When the 2D model (two 20°N grabens linked by a 60°N discontinuity experiencing discrete slip and acting as a transform) is submitted to dominant E-W extension, the resulting extensional stress field displays large symmetric  $\sigma_3$  deviations at the extremities of the transform zone, very similar to those reconstructed from field data (Lacombe *et al.*, 1993).

These results support the interpretation that the Rhine-Saône transform zone, acting during the Oligocene extension, induced regional-scale perturbations of related  $\sigma_3$  trajectories.

---

INTRODUCTION. – Ce travail complète une précédente étude réalisée dans la partie nord de la Zone Transformante Rhin-Saône (Lacombe *et al.*, 1990, 1993). Outre la caractérisation d'une succession d'états de contraintes pendant le Cénozoïque, ce travail avait montré l'existence de déviations d'échelle régionale de la direction de l'extension oligocène entre les fossés de la Bresse et du Rhin, et un modèle de perturbations de contraintes avait été proposé. Ces perturbations ont alors été mises en relation avec un mouvement décrochant-extensif sénestre le long d'un système de failles de socle orientées N060° jouant en zone transformante pendant l'ouverture des deux fossés. Il s'avérait néanmoins indispensable d'étendre l'analyse dans la partie sud de la Zone Transformante afin de

mieux contraindre le modèle de perturbations de contraintes et de vérifier si le dispositif présente une symétrie : c'est l'objet de cette Note.

I. CADRE STRUCTURAL DE L'ÉTUDE : LES PLATEAUX DU JURA EXTERNE. – La tectogenèse pontienne du Jura est associée à l'activité de chevauchements et de décrochements au-dessus d'un niveau de décollement constitué par les évaporites du Keuper. Ces évaporites ont permis à la couverture mésozoïque, désolidarisée du socle profond, de se déplacer vers le NW en chevauchant les plateaux de Haute-Saône et les fossés de la Saône et du Rhin (Lienhardt, 1962 ; Chauve *et al.*, 1980 ; Mugnier et Vialon, 1987).

Avant les déformations pontiennes, le Jura correspondait à une plate-forme semblable aux actuels plateaux de Haute-Saône. La reconstitution de l'évolution tectonique de la partie sud de la Zone Transformante Rhin-Saône, et plus précisément la détermination des directions d'extension à l'Oligocène, implique donc l'analyse de la fracturation dans la partie nord et nord-ouest NW du Jura. Notre étude s'est donc orientée vers les plateaux du Jura externe (*fig. 1*), qui contrastent avec les faisceaux où se sont concentrées les déformations pontiennes, et qui sont donc susceptibles d'avoir conservé intact l'enregistrement de tectoniques plus anciennes. Enfin, quelques sites en zone plissée au Sud du fossé rhénan ont également été étudiés.

La tectogenèse du Jura ne s'est accompagnée d'aucune rotation notable des unités structurales. Les études paléomagnétiques de Johnson *et al.* (1984), Eldredge *et al.* (1985) et Gehring *et al.* (1991) confortent le modèle de décollement de la couverture et de son transport sans rotation vers le NW (Laubscher, 1980). Les directions de paléocontraintes reconstituées pour les épisodes tectoniques antérieurs au Pontien reflètent donc les directions de l'époque. Par ailleurs, la faible flèche du chevauchement du Jura sur les fossés oligocènes (10 km maximum) et la faible déformation des plateaux conduisent à considérer nos sites de mesure comme pratiquement « en place » (*fig. 1*).

II. RÉSULTATS DE L'ANALYSE TECTONIQUE : JURA EXTERNE ET SUD DU FOSSÉ RHÉNAN. – L'analyse a porté sur les failles à stries, fentes de tension et stylolites, et les tenseurs de contraintes ont été calculés à l'aide des méthodes inverses (Angelier, 1984).

a. Dans le plateau de Quingey, les formations jurassiques sont découpées par des accidents subméridiens, chevauchants vers l'Ouest ou à jeu sénestre. L'analyse tectonique met en évidence une compression N130°, responsable des jeux décrochants sénestres des accidents N160° à N-S et dextres des accidents E-W à N100°. La direction N110-130° de  $\sigma_1$  est confirmée par l'orientation des pics stylolitiques.

Une extension N080°, associée à des failles normales subméridiennes, a aussi été identifiée (*fig. 2*). Bien exprimée en bordure du fossé bressan, cette extension est probablement oligocène, mais n'avait pas été reconnue clairement jusqu'alors (Sopena et Soulas, 1973 ; Tschanz, 1992). Certaines de ces failles normales, orientées N160° à N010°, portent également des stries décrochantes et/ou sont reprises par des stylolites orientés N110-130°. Ces observations indiquent un rejeu sénestre de ces plans de failles lors de la compression N130°, qui est donc postérieure à l'extension N080°.

b. Dans le plateau d'Ornans-Montrond, de nombreuses failles normales ont été observées. Dans la partie ouest du plateau, elles sont associées à une direction d'extension N080° à E-W. Vers l'Est, cette direction d'extension devient progressivement N130°, marquée par des failles normales orientées N-S à N040°, parallèles aux petits fossés d'effondrement d'Ornans et d'Étalans. Encore plus à l'Est, la direction d'extension devient N110-120° dans le secteur de Pierrefontaine-Sancey (*fig. 2*).

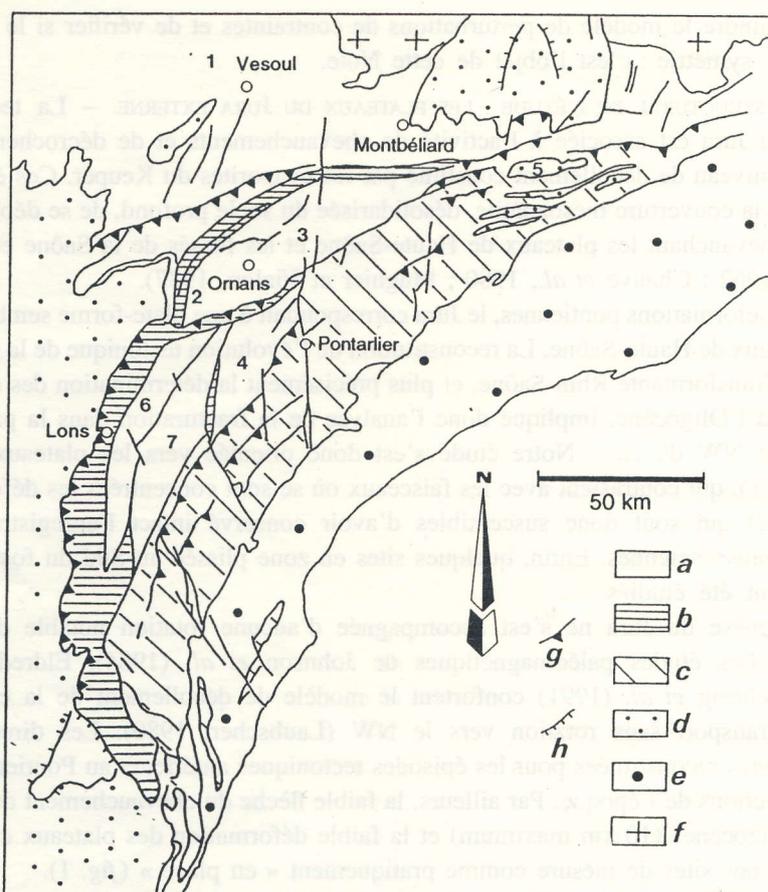


Fig. 1. – Esquisse structurale du Jura. *a* : Couverture mésozoïque des plateaux du Jura externe et des plateaux de Haute-Saône ; *b* : faisceaux du Jura externe ; *c* : Jura plissé ; *d* : fossés et bassins oligocènes ; *e* : bassin molassique péri-alpin ; *f* : socle cristallin ; *g* : failles inverses et chevauchements (triangles du côté chevauchant) ; *h* : failles normales (barbes du côté effondré). 1 : plateaux de Haute-Saône ; 2 : plateau de Quingey ; 3 : plateau d'Ornans-Montrond ; 4 : plateau de Levier ; 5 : bassins de Laufen et Délémont ; 6 : plateau de Lons ; 7 : plateau de Champagnole.

Fig. 1. – Structural sketch of the Jura mountains. *a*: Mesozoic cover of the plateaux of the Haute-Saône and the external Jura. *b*: external Jura group; *c*: folded internal Jura; *d*: Oligocene basins; *e*: Miocene molassic basin; *f*: crystalline basement; *g*: thrusts (triangles on upthrust side); *h*: normal faults (barbs on downthrow side). 1: Haute-Saône plateaux; 2: Quingey plateau; 3: Ornans-Montrond plateau; 4: Levier plateau; 5: Laufen-Delemont basins; 6: Lons plateau; 7: Champagnole plateau.

De nombreux décrochements ont aussi été mesurés. Les décrochements sénestres d'azimuts N020° à N050° et dextres d'azimuts N120° à N160° correspondent à une compression N-S à N010°, alors que les décrochements sénestres d'azimuts N160° à N020° et dextres d'azimuts E-W à N130° sont plutôt compatibles avec une compression N130°. Cette compression devient progressivement N150° en allant vers l'Est.

La chronologie de ces régimes de paléocontraintes ne peut être établie sur des bases stratigraphiques. Cependant, la large distribution des failles normales observées à partir de la bordure est de la Bresse ainsi que les données de chronologie relative suggèrent que l'extension est oligocène. Les structures correspondantes ont ensuite été soit préservées, soit réactivées en failles-plies pincées ou décrochements sénestres au cours de la compression

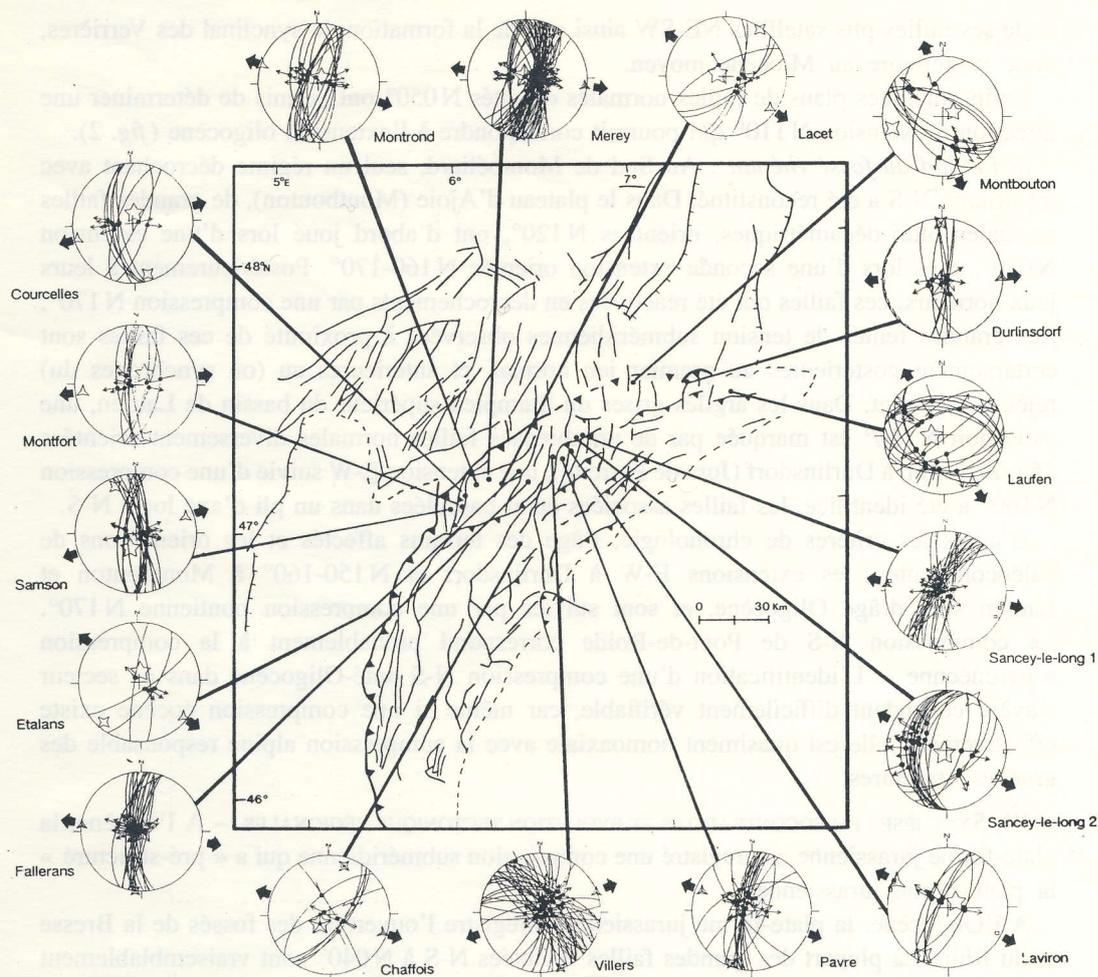


Fig. 2. – Failles normales et orientations des paléocontraintes à l'Oligocène dans les plateaux du Jura externe et le bassin de Laufen. Coordonnées des sites et caractéristiques précises des tenseurs : cf. Lacombe (1992). Projection de Schmidt, hémisphère inférieur. Traces cyclographiques et points avec flèches : plans de failles et stries correspondantes (toutes normales). Étoiles à 5, 4 et 3 branches : axes calculés  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . Flèches noires : directions d'extension.

Fig. 2. – 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 ( $\sigma_1$ ), 4 points ( $\sigma_2$ ), or 3 points ( $\sigma_3$ ); Direction of extension as black arrows. For site locations and characteristics of stress tensors, see Lacombe (1992).

pontienne. La compression N-S, qui est antérieure à l'extension oligocène, pourrait alors refléter la compression éocène dite « pyrénéenne » reconnue plus au Nord (Bergerat, 1985 ; Lacombe *et al.*, 1993).

Enfin, quelques failles normales orientées E-W à N 120° indiquent une extension faible, dirigée N-S à N 030°, qu'aucun élément de chronologie ne permet cependant de dater.

c. Dans le plateau de Levier, des systèmes de décrochements sénestres d'azimut N 020° à N 075° et dextres d'azimut N 110° à N 160° indiquent une compression N-S.

Une seconde compression, N 110° à N 130°, est marquée par le jeu (ou le rejeu) décrochant sénestre des accidents subméridiens et par le jeu dextre des décrochements N 050° à E-W. Elle est responsable du rejeu sénestre du grand décrochement de Pontarlier

et de ses failles-plis satellites NE-SW ainsi que de la formation du synclinal des Verrières, donc postérieure au Miocène moyen.

Enfin, quelques plans de failles normales orientés N050° ont permis de déterminer une direction d'extension N110° qui pourrait correspondre à l'extension oligocène (fig. 2).

*d. Le Sud du fossé rhéan* : Au Sud de Montbéliard, seul un régime décrochant avec  $\sigma_1$  orienté N-S a été reconstitué. Dans le plateau d'Ajoie (Montbouton), de grandes failles normales pluri-décamétriques, orientées N120°, ont d'abord joué lors d'une extension N030°, puis lors d'une seconde extension orientée N160-170°. Postérieurement à leurs jeux normaux, ces failles ont été réactivées en décrochements par une compression N170°. Les grandes fentes de tension subméridiennes observées à proximité de ces failles sont certainement postérieures au premier jeu normal, et antérieures au (ou synchrones du) rejeu décrochant. Dans les argiles grises du Stampien supérieur du bassin de Laufen, une extension N150° est marquée par de nombreuses failles normales diversement orientées (fig. 2). Enfin, à Durlinsdorf (Jura de Ferrette), une extension E-W suivie d'une compression N160° a été identifiée, les failles associées étant basculées dans un pli d'axe local N-S.

D'après les critères de chronologie, l'âge des terrains affectés et les orientations de paléocontraintes, les extensions E-W à Durlinsdorf et N150-160° à Montbouton et Laufen sont d'âge Oligocène, et sont suivies par une compression pontienne N170°. La compression N-S de Pont-de-Roide correspond probablement à la compression « pyrénéenne ». L'identification d'une compression N-S anté-Oligocène dans ce secteur s'avère cependant difficilement vérifiable, car même si une compression éocène existe effectivement, elle est quasiment homoaxiale avec la compression alpine responsable des grandes structures.

III. SYNTHÈSE : PALÉOCONTRAINTE ET ÉVOLUTION TECTONIQUE RÉGIONALES. – A l'Eocène, la plate-forme jurassienne a enregistré une compression subméridienne qui a « pré-structuré » la plate-forme jurassienne.

A l'Oligocène, la plate-forme jurassienne enregistre l'ouverture des fossés de la Bresse et du Rhin. La plupart des grandes failles orientées N-S à N040° sont vraisemblablement héritées de cet épisode extensif. La direction d'extension n'est pas homogène : l'orientation de  $\sigma_3$  est proche de N90° en bordure du fossé bressan, N110-120° dans la partie NE du plateau d'Ornans et devient N150-160° dans le plateau d'Ajoie et le bassin de Laufen (fig. 2). Comme dans la partie nord de la Zone Transformante, la direction d'extension oligocène, principalement E-W à proximité des fossés, est donc progressivement déviée jusqu'à une direction N130° à N150° (Lacombe *et al.*, 1993 : fig. 3).

Au Mio-Pliocène, la couverture des plateaux a réagi en bloc à la compression et s'est comportée de façon rigide, en transmettant la contrainte sans se déformer notablement. La direction de compression, N110° à N130° dans les plateaux de Quingey, Levier et Ornans, devient N160° à N-S au Sud du fossé rhéan. Cette compression correspond au paroxysme de mise en place du Jura (Caire, 1974).

L'âge et la signification de l'extension N-S à N030° sont incertains. Dans la plupart des sites où elle a été identifiée, cette extension discrète est antérieure à la compression pontienne comme à l'extension N120° oligocène. Il peut s'agir soit d'une extension oligocène précoce (par permutation  $\sigma_2/\sigma_3$ ), soit d'une extension crétacée.

IV. L'EXTENSION OLIGOCÈNE DANS LE SUD DE LA ZONE TRANSFORMANTE RHIN-SAÔNE. – La direction de l'extension oligocène n'est donc pas homogène dans la partie sud (comme dans la partie nord) de la Zone Transformante Rhin-Saône : la direction de  $\sigma_3$  subit de fortes déviations horaires (jusqu'à 45-50°) au Sud du fossé rhéan, comme cela avait été observé

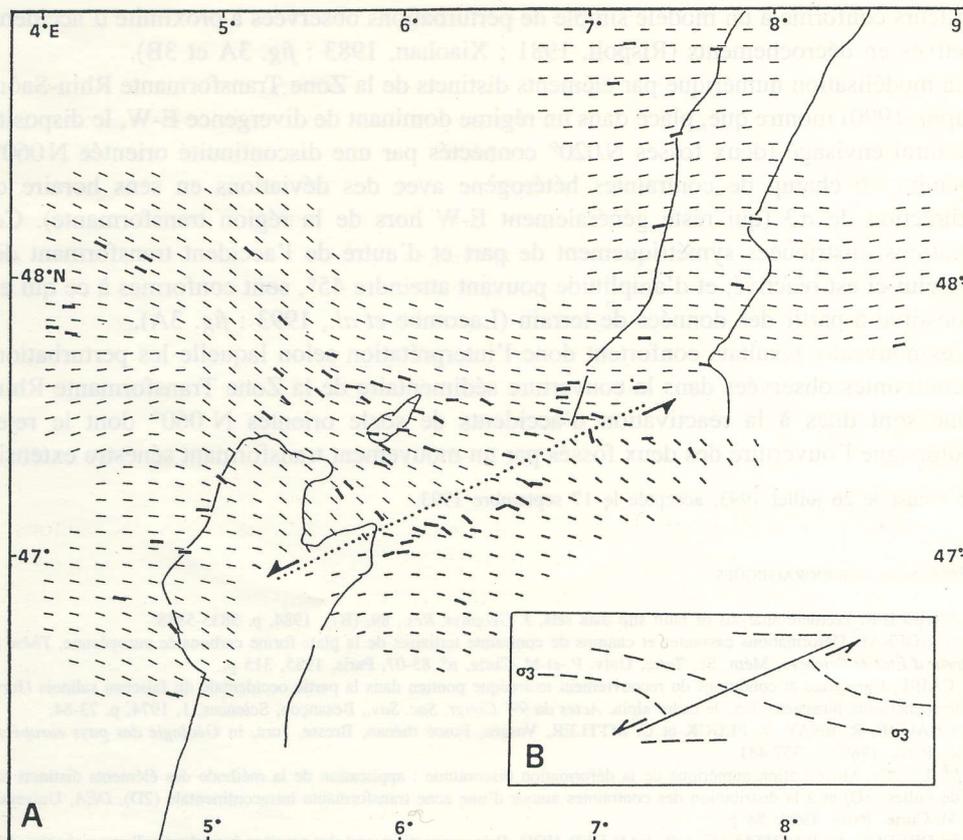


Fig. 3. – Trajectoires de la contrainte principale minimale  $\sigma_3$  oligocène dans la Zone Transformante Rhin-Saône : résultats et interprétation. A : trajectoires de  $\sigma_3$  interpolées à partir des données de terrain (tiretés épais), à l'aide du programme « lissage » (Lee et Angelier, 1993). 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  $\sigma_3$  à proximité d'un accident réactivé en décrochement sénestre, d'après les observations de terrain et les modélisations numériques (Xiaohan, 1983).

Fig. 3. –  $\sigma_3$  trajectories related to the Oligocene extension in the Rhine-Saône transform zone. A. Actual  $\sigma_3$  trajectories: the heavy dashes represent local  $\sigma_3$  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:  $\sigma_3$  trajectories in the vicinity of a preexisting fracture reactivated as a sinistral strike-slip fault, from field observations and numerical modelling (Xiaohan, 1983).

au Nord du fossé de la Bresse (fig. 3). Ces déviations ne sont pas brutales : l'extension évolue progressivement de la direction E-W jusqu'à la direction la plus perturbée N130-150°. La direction E-W est généralement absente dans les sites où une extension déviée est identifiée, ce qui tend à confirmer qu'il s'agit bien de la même extension.

La vaste répartition géographique et l'amplitude angulaire de ces déviations de  $\sigma_3$ , jointes à leur symétrie approximative par rapport au centre de la Zone Transformante (fig. 3A), suggèrent vivement qu'elles résultent de perturbations de contraintes d'échelle régionale en relation avec la réactivation en décrochement extensif sénestre d'un système d'accidents profonds orientés ENE-WSW (Lacombe *et al.*, 1993). La distribution des contraintes est

d'ailleurs conforme à un modèle simple de perturbations observées à proximité d'accidents réactivés en décrochements (Rispoli, 1981 ; Xiaohan, 1983 : fig. 3A et 3B).

La modélisation numérique par éléments distincts de la Zone Transformante Rhin-Saône (Dupin, 1990) montre que, placé dans un régime dominant de divergence E-W, le dispositif structural envisagé (deux fossés N020° connectés par une discontinuité orientée N060°) engendre un champ de contraintes hétérogène avec des déviations en sens horaire de la direction de  $\sigma_3$  (qui reste généralement E-W hors de la région transformante). Ces déviations, distribuées symétriquement de part et d'autre de l'accident transformant dès que celui-ci est réactivé, et d'amplitude pouvant atteindre 45°, sont conformes à ce qui est reconstitué à partir des données de terrain (Lacombe *et al.*, 1993 : fig. 3A).

Ces nouveaux résultats confortent donc l'interprétation selon laquelle les perturbations de contraintes observées dans la couverture sédimentaire de la Zone Transformante Rhin-Saône sont dues à la réactivation d'accidents de socle orientés N 060° dont le jeu accompagne l'ouverture des deux fossés par un mouvement transformant sénestre extensif.

Note remise le 26 juillet 1993, acceptée le 17 septembre 1993.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- J. ANGELIER, Tectonic analysis of fault slip data sets, *J. Geophys. Res.*, 89, (B7), 1984, p. 5835-5848.
- F. BERGERAT, Déformations cassantes et champs de contrainte tertiaires de la plate-forme carbonatée européenne, *Thèse de Doctorat d'État-ès Sciences*, Mém. Sc. Terre, Univ. P.-et-M.-Curie, n° 85-07, Paris, 1985, 315 p.
- A. CAIRE, Caractères et conditions du recouvrement tectonique pontien dans la partie occidentale du faisceau salinois (Jura). Les décrochements jurassiens dans le cadre alpin, *Actes du 99<sup>e</sup> Congr. Soc. Sav.*, Besançon, Sciences, 1, 1974, p. 73-84.
- P. CHAUVE, R. ENAY, P. FLUCK et C. SITTNER, Vosges, Fossé rhénan, Bresse, Jura, in *Géologie des pays européens*, Dunod, Paris, 1980, p. 357-431.
- J. M. DUPIN, Modélisation numérique de la déformation discontinue : application de la méthode des éléments distincts aux jeux de failles (3D) et à la distribution des contraintes autour d'une zone transformante intracontinentale (2D), *DEA*, Université P.-et-M.-Curie, Paris, 1990, 88 p.
- S. ELDRIDGE, V. BACHTADSE et R. VAN DER VOO, Paleomagnetism and the orocline hypothesis, *Tectonophysics*, 119, 1985, p. 153-179.
- A. U. GEHRING, P. KELLER et F. HELLER, Paleomagnetism and tectonics of the Jura arcuate mountain belt in France and Switzerland, *Tectonophysics*, 186, 1991, p. 269-278.
- R. J. E. JOHNSON, R. VAN DER VOO et W. LOWRIE, Paleomagnetism and late diagenesis of Jurassic carbonate from the Jura mountain, Switzerland and France, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 95, p. 478-488.
- O. LACOMBE, Maclage, fracturation et paléocontraintes intraplaques : application à la plate-forme carbonatée ouest-européenne, *Thèse de Doctorat-ès-Sciences*, Université Pierre-et-Marie-Curie, Mém. Sciences de la Terre, 92-24, 1992, 316 p.
- O. LACOMBE, J. ANGELIER, F. BERGERAT et P. LAURENT, Tectoniques superposées et perturbations de contraintes dans la Zone Transformante Rhin-Saône : apport de l'analyse des failles et des macles de la calcite, *Bull. Soc. géol. France*, (8), VI, 5, 1990, p. 853-863.
- O. LACOMBE, J. ANGELIER, D. BYRNE et J. M. DUPIN, Eocene-Oligocene tectonics and kinematics of the Rhine-Saône continental transform zone (Eastern France), *Tectonics*, 12, 4, 1993, p. 874-888.
- H. P. LAUBSCHER, Die Entwicklung des Faltenjuras. Daten und Vorstellungen, *Neues Jahrb. Paläontol.*, 160, 1980, p. 289-320.
- J. C. LEE et J. ANGELIER, Paleostress trajectories maps based on the results of local determinations: the "lissage" program, *Computers and Geosciences*, 1993 (sous presse).
- G. LIENHARDT, Géologie du bassin houiller stéphanois du Jura et de ses morts terrains, *Mém. BRGM*, 9, 1962, 449 p.
- J. L. MUGNIER et P. VIALON, Deformation and displacement of the Jura cover on its basement, *J. Struct. Geol.*, 8, 1986, p. 373-387.
- R. RISPOLI, Stress fields about strike-slip faults inferred from stylolites and tension gashes, *Tectonophysics*, 75, 1981, p. 29-36.
- J. P. SOPENA et J. P. SOULAS, Études microtectoniques dans le Jura. Déformations des calcaires sous contrainte tectonique : essais d'interprétation et de corrélation des résultats pour l'ensemble de la Chaîne, *Thèse de Doctorat-ès-Sciences*, Université de Besançon, 1973, 154 p.
- X. TSCHANZ, Analyses structurales et microstructurales dans le Jura central franco-suisse. Essai d'interprétation cinématique, *Thèse de Doctorat-ès-Sciences*, Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, 1992, 120 p.
- L. XIAOHAN, (I) Perturbations de contraintes liées aux structures cassantes dans les calcaires fins du Languedoc. Observations et simulations mathématiques. (II) Mesure de la déformation finie à l'aide de la méthode Fry. Application aux gneiss des Bormes (massif des Maures), *Thèse de Doctorat-ès-Sciences*, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 1983, 152 p.

Laboratoire de Tectonique Quantitative, Université Pierre-et-Marie-Curie,  
URA n° 1315 CNRS, Tour 26-25, E<sub>1</sub>, Boîte 129,  
4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05, France.