Bull. Soc. géol. France, 1990, (8), VI, n° 5, pp. 853–863.

Séance spécialisée :
Téthys
Paris, 12-13 décembre 1989

Tectoniques superposées et perturbations de contrainte dans la zone transformante Rhin-Saône : apport de l'analyse des failles et des macles de la calcite

par OLIVIER LACOMBE*, JACQUES ANGELIER*, FRANÇOISE BERGERAT* et PHILIPPE LAURENT**

Mots clés. – Tectoniques superposées, Tectonique cassante, Etat de contrainte, Perturbation de contrainte, Zone transformante, Macles de la calcite, Chronologie relative.

Résumé. – L'analyse systématique de la déformation à l'échelle macroscopique (failles à stries, stylolites, fentes de tension) et microscopique (macles de la calcite) a permis la reconstitution de l'histoire tectonique de la plate-forme bourguignonne. En effet, la séparation des phases tectoniques superposées, fondée à la fois sur des critères qualitatifs et quantitatifs a abouti à la distinction de 4 états de contrainte ayant affecté la région d'étude : (1) extension N020°, (2) compression N000°, (3) extension N130°, (4) compression N110°.

La permutation des contraintes $\sigma 1$ et $\sigma 2$ a été fréquemment invoquée pour rendre compte de la bimodalité de la fracturation (décrochements et failles normales) à proximité des fossés oligocènes. Nous proposons ici de considérer l'existence d'une étape intermédiaire entre les décrochements compatibles avec la compression N-S éocène supérieur et les failles normales liées à l'extension oligocène dans le rift ouest européen. Il pourrait s'agir de décrochements «extensifs», engendrés en régime de traction et donc présentant éventuellement une légère composante normale. Ces décrochements extensifs constitueraient la manifestation superficielle du premier stade de mise sous traction de la plaque eurasiatique après la compression fini-éocène.

Nous interprétons par ailleurs les directions d'extension NW-SE comme des perturbations liées à la réactivation de la faille de socle Rhin-Saône en zone transformante lors de l'ouverture des fossés de la Bresse et du Rhin à l'Oligocène. Un nouveau modèle cinématique, faisant intervenir une composante extensive transverse lors du mouvement décrochant est proposé; cette composante extensive, dirigée NW-SE, est incompatible avec une permanence régionale significative de la compression N-S.

Polyphase tectonics and stress perturbations in the Rhine-Saône transform zone inferred from both analyses of calcite twins and fault slips

Key words. – Polyphase tectonics, Brittle tectonics, Stress regime, Stress perturbation, Transform zone, Calcite twins, Relative chronology.

Abstract. – Palaeostress reconstructions based on joint analyses of calcite twins and fault slips have been carried out at the regional scale on the Burgundy platform, from the «Avant-Monts» of Jura to the southeastern Paris basin. The main results include (1) the regional consistency of palaeostress directions independently reconstructed with both methods : (a) NNE-SSW extension, (b) N-S compression, (c) NW-SE extension, (d) WNW-ESE compression (fig. 1); (2) the complementarity of the two methods (3), the estimates of differential stress magnitudes based on calcite twin analysis.

In the present paper, we first show how successive superimposed tectonic events can be separated, taking the polyphase site of Prauthoy for a case example. To establish the chronology of macroscopic brittle deformations (i.e., faults), we used both qualitative (fig. 2) and quantitative criteria (separation based on taking into account mechanical consistency, or computer-based process leading to automatic separation : fig. 3). For microscopic deformation (i.e., calcite twinning), we discuss the theoretical and the practical ability of the method for separating different phases within polyphase data set. We show that separation of several stress regimes is possible by using computer-based process. The inversion of field data (fault slips or calcite twins) yields the orientations of the 3 principal stress axes $\sigma 1$, $\sigma 2$ and $\sigma 3$ as well as the ratio of principal stress differences $\Phi = (\sigma 2-\sigma 3)/(\sigma 1-\sigma 3)$, as figure 4 and table I show.

Several authors have claimed that the permutation of stresses $\sigma 1$ and $\sigma 2$ accounts for the transition between the N-S compressional phase (that corresponds to strike-slip faults in the platform foreland) and the E-W extensional phase (normal faults near the Oligocene rift system : fig. 6). But this phenomenon has not yet been explained. We point out first that the Oligocene extension appears to be a widespread stress regime which can be reconstructed even in areas far from the West European rift. We propose a model of extensional strike-slip faults, pure or with a slight normal component (fig. 5), created during the first stage of an extensional event. Such strike-slip faults may be the first superficial expression of extension inside the Eurasiatic plate, whereas normal faults (inherited or neoformed) develop at depth when extensional deformation increases and appear at the surface only a later stage. This model may account for the common development of strike-slip faults prior to a clearly extensional event (e.g., gulf of Suez) or for the association of strike-slip and normal faults in space and time in several extensional provinces (Basin and Range).

The obliquity of the main basement fault (that trends N060° according to Bergerat [1985]), compared with the general E-W direction of the opening of the Oligocene rift system leads us to prefer an "extensive left-lateral" motion rather than a pure strike-slip one. According to this interpretation and in terms of rigid kinematics, a significant NW-SE transverse component of motion had to occur (fig. 7a); it was probably accommodated in the sedimentary cover by very numerous tension gashes (trending N000° to N025°) effectively present in the transition zone between the Rhine and Saône grabens.

* Lab. Tectonique Quantitative, URA 1315 CNRS, Univ. P. et M. Curie, 75252 Paris cedex 05.
** Lab. Tectonique et Géochronologie, URA 1371 CNRS, Univ. des Sciences et Techniques du Languedoc, 34060 Montpellier cedex.
Note présentée et déposée à la séance du 13 décembre 1989; manuscrit définitif accepté le 30 avril 1990.

The NW-SE direction of extension indicated by both methods (fault and calcite twin analyses : fig. 7b) corresponds to a regional perturbation of the σ3 trajectories during the Oligocene, in contrast with the general direction of σ3 that trends E-W in the West European rift (fig. 6). This stress perturbation cannot be due to inherited Hercynian faults trending N020° to N040° that were simply reactivated as normal faults. We propose rather to relate this perturbation to the extensive left-lateral motion of the Rhine-Saône transform zone. Then, we discuss the agreement of this interpretation with stress perturbations involved by models of Ricou [1978] and Xiaohan [1983] (fig. 7c).

Finally, the absence of perturbations of σ1 trajectories related to the late Eocene N-S compression near the transform zone as well as the existence of a NW-SE transverse divergent component demonstrate that the major activity of this transform zone occurred during the Oligocene extension, in the absence of significant regional N-S compression.

I. – Introduction

Les méthodes de reconstruction des paléocontraintes fondées respectivement sur l'étude des jeux de faille [Carey et Brunier, 1974; Armijo et Cisternas, 1978; Etchecopar *et al.*, 1981; Angelier, 1984; 1989; Etchecopar et Mattauer, 1988] et sur l'analyse des macles de la calcite [Laurent *et al.*, 1981; Laurent, 1984; Laurent *et al.*, 1990] ont été appliquées conjointement le long d'un profil allant depuis les «Avant-Monts» du Jura jusqu'à la partie SE du Bassin parisien. Le long de ce profil, qui recoupe la zone de transition entre les fossés de la Saône et du Rhin, six sites ont été examinés avec cette double approche [Lacombe *et al.*, 1989a] (fig. 1). Le contexte géologique est tout à fait approprié pour une telle étude : en effet, les terrains à l'affleurement, d'âge jurassique moyen à supérieur, fournissent des faciès favorables à l'analyse microscopique (calcite sparitique) ainsi qu'à l'observation microtectonique (microfailles striées, stylolites, fentes de tension) : de plus, les sites d'étude sont localisés dans un cadre géologique bien défini [Bergerat, 1985] à proximité de grandes structures comme le Rift ouest européen ou le Jura. Enfin, le polyphasage tectonique est évident en dépit du faible taux de déformation [Bergerat, 1985; Lacombe, 1989; Lacombe *et al.*, 1989a].

Dans la présente note, nous voulons d'abord montrer comment il est possible d'obtenir et de séparer les diverses phases en contexte de tectoniques superposées, à la fois à partir des failles et des macles de la calcite, et de caractériser ainsi les directions des paléocontraintes. Nous tenterons ensuite d'intégrer ces données dans la cinématique régionale, en interprétant les directions de paléocontraintes dans un cadre général (champs de contrainte à l'échelle de la plate-forme européenne) ou régional (perturbations de contrainte engendrées par la zone transformante Rhin-Saône).

II. – Principaux résultats de l'analyse comparée des failles et des macles de la calcite dans la plate-forme bourguignonne

Les résultats de l'étude menée dans la plate-forme bourguignonne ont été exposés en détail par ailleurs [Lacombe *et al.*, 1989a; Lacombe *et al.*, 1990]. Trois grandes conclusions ont été dégagées :

1) *cohérence régionale des paléocontraintes reconstituées indépendamment à partir des deux méthodes (failles et macles de la calcite)* : la figure 1 résume les résultats de cette étude. On remarque la concordance des directions de paléocontrainte reconstituées par les deux méthodes lorsqu'elles sont appliquées dans un même site;

2) *complémentarité des deux méthodes* : dans certains des 6 sites présentés, le tenseur correspondant à un épisode tectonique n'a pu être obtenu que par l'une des deux méthodes : dans le site de Montagney (site 2), la compression N-S n'a pu être caractérisée que par les macles de la calcite; en revanche, dans le site de Taxenne (site 1), l'extension NW-SE n'a été mise en évidence qu'à l'aide des failles. Les deux méthodes apparaissent donc tout à fait complémentaires. De plus, dans les deux cas cités, l'unique tenseur déterminé est cohérent avec ceux calculés dans les autres sites. Plus généralement, considérant la cohérence des deux méthodes dans les sites où elles sont toutes deux applicables (cf. supra et fig. 1), on peut raisonnablement intégrer les résultats des sites où une seule des deux méthodes fournit des tenseurs. Ceci permet d'accroître la densité du réseau de directions de paléocontrainte, et donc d'en fournir une meilleure cartographie;

3) *estimation des magnitudes des paléocontraintes* : la valeur du seuil de maclage de la calcite pouvant être considérée comme constante [Tullis, 1980], l'analyse des macles de la calcite permet l'estimation des magnitudes des paléocontraintes en fournissant les valeurs des contraintes différentielles σ1-σ3 et σ2-σ3 [Lacombe *et al.*, 1990; Laurent *et al.*, 1990].

Ces différents points démontrent donc l'intérêt de la confrontation systématique des deux méthodes pour la reconstitution précise des trajectoires de paléocontrainte en contexte de plate-forme.

III. – Séparation des phases en contexte de tectoniques superposées : un exemple

Une des caractéristiques principales de la région étudiée est le polyphasage tectonique très net qui affecte les formations géologiques. Tous les sites examinés (dans la suite du texte, nous prendrons comme exemple le site de Prauthoy; localisation fig. 1 : site 4) présentent une superposition de structures cassantes non compatibles entre elles et donc probablement d'âge différent, ce qui requiert une séparation précise des phases tectoniques successives.

a) Analyse des structures macroscopiques

1) Séparation qualitative des jeux de faille à partir de critères de chronologie relative

— Identification de mouvements successifs sur une même structure

• *Superposition de stries* : dans le site de Prauthoy, certains accidents d'azimut 020°-040° portent deux familles de stries, les unes horizontales ou légèrement obliques (carac-

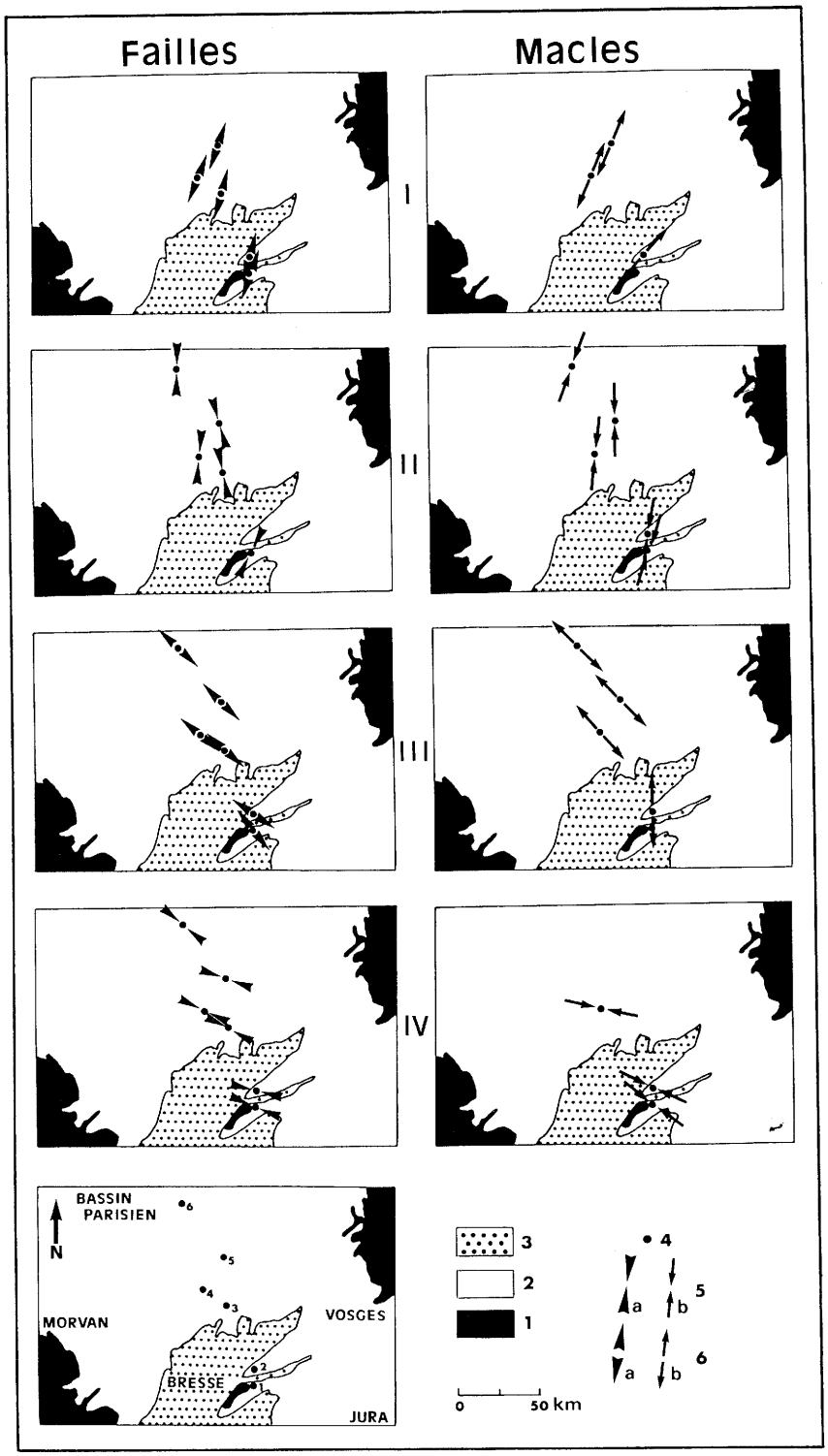

FIG. 1. – Directions de paléocontrainte reconstituées à partir de l'étude des failles et des macles de la calcite.
I : phase d'extension (probablement Mésozoïque supérieur); II : phase de compression «pyrénéenne»; III : phase d'extension oligocène; IV : phase de compression «alpine».
1 : socle; 2 : formations sédimentaires mésozoïques; 3 : fossé oligocène de la Bresse; 4 : sites d'étude (1 : Taxenne, 2 : Montagney, 3 : Champlitte, 4 : Prauthoy, 5 : St Geosmes et 6 : Chaumont); 5 : directions de compression reconstituées par les failles (a) et les macles (b); 6 : directions d'extension reconstituées par les failles (a) et les macles (b).

FRIG. 1. – *Paleostress directions reconstructed from fault slip analysis and calcite twin analysis.*
I : *NNE-SSW extension (probably late Mesozoic in age);* II : *N-S "pyrenean" compression;* III : *NW-SE Oligocene extension;* IV : *WNW-ESE "Alpine compression".*
1 : *Hercynian basement;* 2 : *Mesozoic sedimentary formations;* 3 : *Oligocene Saône graben;* 4 : *sites of analysis;* 5 : *directions of compression inferred from fault slip analysis* (a) *and calcite twin analysis* (b); 6 : *directions of extension inferred from fault slip analysis* (a) *and calcite twin analysis* (b).

téristiques d'un jeu décrochant), les autres à pitch fort (caractéristiques d'un jeu normal). Dans le détail, plusieurs cas de striations superposées ont été observés sur les miroirs de failles et indiquent la chronologie probable des jeux (fig. 2A) : décrochement d'abord, jeu normal ensuite.

• *Réactivation d'une fente de tension en faille normale,* dans le site pris comme exemple, cette réactivation des fentes de tension à cristallisations de calcite s'accompagne de l'abrasion des cristaux dans les parties soumises au frottement et de leur conservation dans les parties abritées (fig. 2B); dans ces conditions, il est clair que le jeu normal est postérieur à la création de la fente de tension.

— *Intersection de structures tectoniques*

L'intersection de failles, lorsqu'elle ne reflète pas des mécanismes synchrones (failles conjuguées) indique une chronologie relative entre les divers épisodes successifs (fig. 2C).

2) *Séparation quantitative des jeux de failles*

Plusieurs méthodes de calcul ont été mises au point afin de séparer automatiquement des classes homogènes de données et de calculer le tenseur correspondant quand les lots de données bruts sont hétérogènes et polyphasés [Angelier et Manoussis, 1980; Etchecopar *et al.*, 1981; Angelier, 1984; Etchecopar et Mattauer, 1988].

Dans le site de Prauthoy, la première étape du traitement des données a consisté en un tri préliminaire des failles selon des critères de géométrie liés à la compatibilité mécanique; on a ainsi séparé les failles normales des décrochements. Cependant, une telle sélection n'est pas toujours applicable; lorsque, la distribution est complexe, de sorte que les mécanismes des différents épisodes sont peu contrastés géométriquement. Dans ces conditions, une séparation automatique, fondée sur l'interaction itérative de calculs de plusieurs tenseurs et de ségrégation de classes en fonction de critères mécaniques, permet d'identifier les différents états de contrainte et les groupes de mesures qui leur correspondent [Angelier et Manoussis, 1980]. Quand par contre la distribution demeure relativement simple, séparation manuelle et séparation automatique conduisent au même résultat [Angelier *et al.*, 1985]. C'est pourquoi, dans le cas étudié ici, la séparation manuelle s'avère justifiée et suffisante. Ainsi, la reconnaissance préalable (d'après des critères de chronologie) de l'existence probable d'au-moins deux directions principales de compression (fini-Eocène N-S et fini-Miocène WNW-ESE : Bergerat [1985]), a facilité le processus de séparation des phases. Deux directions de compression, cohérentes et bien contraintes (fig. 3c et 3e) ont effectivement pu être distinguées. Cette distinction s'est révélée significative, car il en a résulté un accroissement considérable du degré d'homogénéité de chaque lot de décrochements. A contrario, bien qu'une seule direction d'extension ait été signalée auparavant dans la région étudiée, la recherche du degré d'homogénéité optimal (angle moyen entre la strie réelle et la strie calculée ou bien usage de la représentation de Mohr) du lot de failles normales mesurées nous a conduits à distinguer deux épisodes extensifs : une extension NNE-SSW (fig. 3b) et une extension NW-SE (fig. 3d).

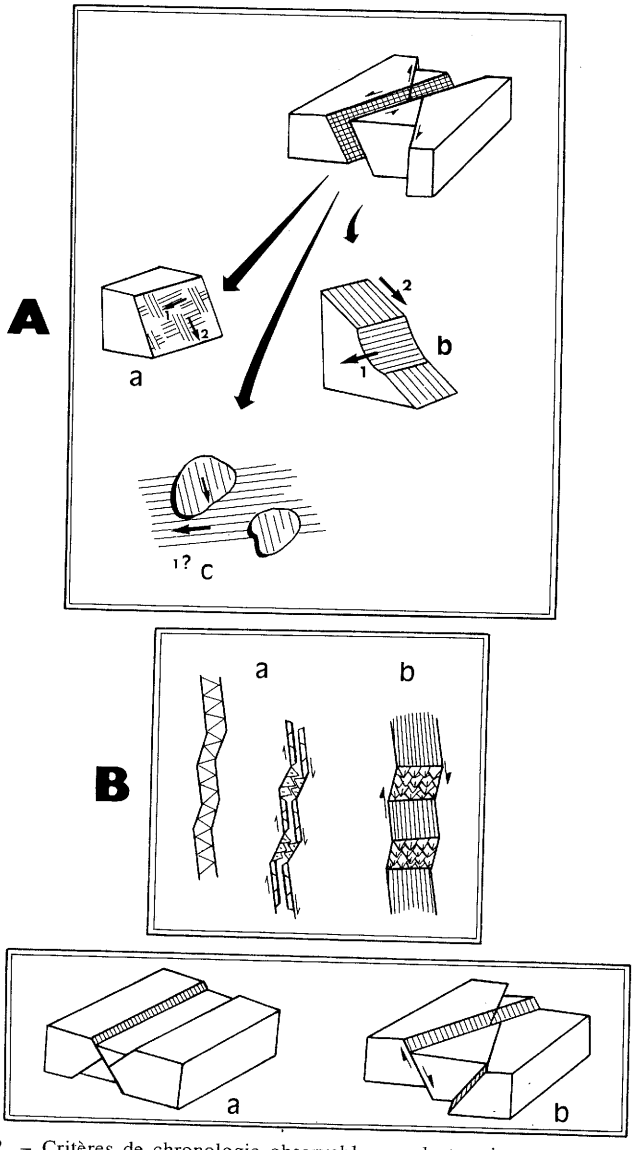

FIG. 2. – Critères de chronologie observables sur le terrain.
A. – Superposition de deux familles de stries sur un plan de faille; dans les deux cas (a et b), la chronologie peut être établie : le mouvement 2 est postérieur au mouvement 1. Dans le cas c (placages de calcite striée superposés sur un miroir de faille), on ne peut pas conclure.
B. – Réactivation d'une fente de tension en faille normale. a : fente de tension avant et après rejeu normal, avec abrasion des cristaux de calcite dans les zones soumises au frottement; b : même structure que pour a, mais vue de face.
C. – Intersection de structures tectoniques. a : failles normales conjuguées, synchrones; b : faille normale recoupant un décrochement préexistant (dans ce cas, la chronologie est établie).

FIG. – *Chronology criteria observable in the field.*
A. – *Superposition of two sets of slickensides on a fault plane; in the two cases* (a *and* b), *the relative chronology can be established : slip 2 is more recent than slip 1. In the case c (superimposed striated calcite sheets on a fault plane), one cannot conclude.*
B. – *Reactivation of a tension gash into a normal fault.* a : *tension gash before and after normal slip, with abrasion of calcite crystals in areas submitted to frictional slip;* b : *same as* a, *front view.*
C. – *Intersection of tectonic features.* a : *conjugate normal faults, synchronous;* b : *normal fault crossing cut a strike-slip fault (in this case, relative chronology is established).*

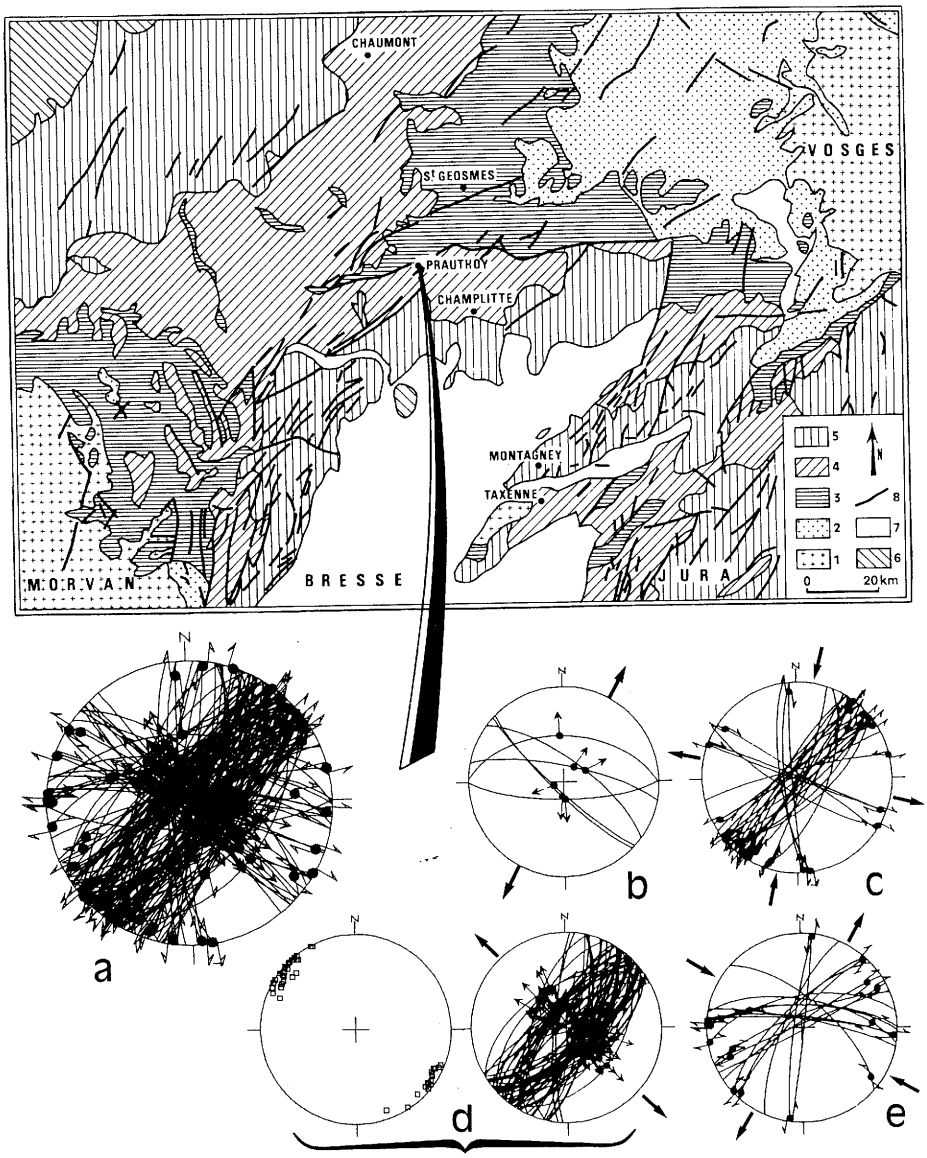

FIG. 3. – Séparation d'états de contrainte successifs à partir des jeux de failles dans le site de Prauthoy.
a : lot brut de données collectées à Prauthoy; b : failles normales compatibles avec une extension NNE-SSW; c : décrochements compatibles avec une compression N-S et une extension E-W; d : fentes de tension (représentées par leur pôle) et failles normales compatibles avec une extension NW-SE; e : décrochements compatibles avec une compression WNW-ESE et une extension NNE-SSW.
Projections cyclographiques des plans de failles et des stries : projection de Schmidt, hémisphère inférieur; les petites flèches centrifuges sur les failles indiquent un jeu normal, les doubles flèches un jeu décrochant. Les flèches noires indiquent la direction probable de paléocontrainte ($\sigma 3$ pour les failles normales, $\sigma 1$ et $\sigma 3$ pour les décrochements) correspondant au lot de données. Le résidu (environ 20 failles) n'a pas été représenté.

FIG. 3. – *Separation of successive stress regimes based on fault slip analysis in the site of Prauthoy.*
a : *entire data set collected in Prauthoy;* b : *normal faults consistent with NNE-SSW extension;* c : *strike-slip faults consistent with N-S compression and E-W extension;* d : *tension gashes (represented as poles) and normal faults consistent with NW-SE extension;* e : *strike-slip faults consistent with WNW-ESE compression and NNE-SSW extension.*
Cyclographic projections of fault planes and slickenside lineations : Schmidt's projection, lower hemisphere. Small centrifugal arrows denote normal slip, double arrows denote strike slip. Arrows indicate the probable direction of paleostress ($\sigma 3$ for normal faults, $\sigma 1$ and $\sigma 3$ for strike-slip faults). The garbage (about 20 faults) has not been represented.

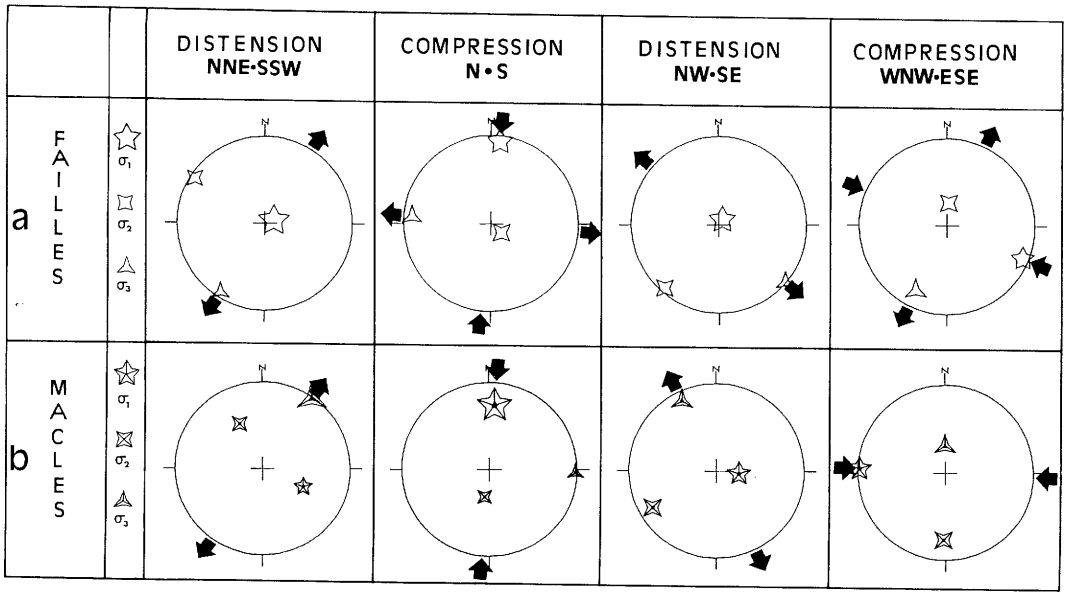

FIG. 4. – Orientations des axes de paléocontrainte calculées à partir des failles (a) et des macles (b) dans le site de Prauthoy. Les larges flèches noires indiquent les directions d'extension ou de compression correspondantes (projection de Schmidt, hémisphère inférieur).

FIG. 4. – *Paleostress orientations computed from fault slip analysis (a) and calcite twin analysis (b) in the site of Prauthoy. Large black arrows indicate corresponding directions of extension or compression (Schmidt's projection, lower hemisphere).*

Cette méthode n'est cependant pas sans limite : il est clair que certaines failles compatibles avec un état de contrainte donné peuvent être en même temps tout à fait compatibles avec un autre régime de contrainte très différent. La classification automatique des données ne peut pas tenir compte de ces «cas-charnières». Il est donc fondamental de tenir compte des aspects qualitatifs (fig. 2) pour la séparation des phases superposées (fig. 3).

En conclusion, le tri qualitatif et quantitatif des populations de jeux de failles dans le site polyphasé de Prauthoy a permis de caractériser 4 régimes de contrainte qui ont successivement affecté la plate-forme bourguignonne (figs. 1, 3, 4a et tableau) : distension NNE-SSW (probablement au Mésozoïque supérieur); compression N-S «pyrénéenne» à l'Eocène supérieur; distension NW-SE à l'Oligocène; compression WNW-ESE «alpine» au Miocène terminal.

b) Analyse des structures microscopiques

Un certain nombre de travaux [Larroque et Laurent, 1988; Laurent *et al.*, 1990] ont montré que la méthode inverse proposée par Etchecopar [1984] et exposée en détail dans Tourneret et Laurent [1990] est bien adaptée à l'étude du polyphasage tectonique fondée sur l'analyse des macles de la calcite. Nous avons donc appliqué cette méthode à nos échantillons supposés *a priori* polyphasés. La première étape du processus de séparation des différents tenseurs de paléocontrainte consiste en la recherche d'une solution initiale par un tirage au hasard d'un grand nombre de tenseurs appliqués à l'ensemble des données, et en la détermination du pourcentage maximal de macles compatibles avec cette solution. La deuxième étape est un processus d'optimisation de la solution obtenue. A l'issue de cette recherche, le tenseur qui explique le plus grand nombre de macles est retenu. Les macles correspondantes étant «écartées», on répète l'opération sur le lot de macles restantes : on peut ainsi

TABLEAU. – Principales caractéristiques des tenseurs de paléocontrainte reconstitués par l'étude des failles et des macles dans le site de Prauthoy. Failles : axes des paléocontraintes σ1, σ2, σ3 (orientation et inclinaison en degrés); rapport Φ = (σ2-σ3/(σ1-σ3); N1 : nombre de failles compatibles avec le tenseur solution; ANG : angle moyen entre strie réelle et strie calculée, en degrés.
Macles : axes des paléocontraintes (orientation et inclinaison en degrés); rapport Φ = (σ2-σ3)/(σ1-σ3); N2 : nombre de plans maclés mesurés; N3 : nombre de plans maclés pris en compte par le tenseur solution.

TABLE. – *Main characteristics of paleostress tensors reconstituted from fault slip and calcite twin analyses in the site of Prauthoy.*
Faults : paleostress axes σ1, σ2 *and* σ3 *(trend and plunge in degrees); ratio* Φ = (σ2-σ3)/(σ1-σ3); N1 : *number of faults consistent with the average tensor solution.* ANG : *average angle between computed shear stress and observed slickenside lineation, in degrees.*
Calcite twins : paleostress axes σ1, σ2 *and* σ3 *(trend and plunge in degrees);* N2 : *number of measured twinned planes;* N3 : *number of twinned planes consistent with the tensor solution.*

	FAILLES				MACLES			
	Axes	Φ	N1	ANG	Axes	Φ	N2	N3
DISTENSION NNE-SSW	072 81 303 05 212 07	0.2	6	12	114 48 333 42 035 02	0.9	190	25
COMPRESSION N-S	006 03 127 85 276 05	0.4	30	10	005 27 190 64 092 02	0	190	119
DISTENSION NW-SE	035 85 221 06 131 01	0.3	74	15	096 69 240 17 334 12	-	190	16
COMPRESSION WNW-ESE	113 07 005 69 206 20	0.5	17	14	273 02 182 24 359 65	0.5	190	30

déterminer plusieurs tenseurs de contrainte [pour les considérations théoriques, voir Etchecopar, 1984; Laurent, 1984; Tourneret, 1987; Tourneret et Laurent, 1990]. Les tenseurs obtenus pour le site de Prauthoy sont présentés dans la figure 4b et le tableau.

Il faut savoir que la «méthode calcite» ne permet pas une séparation des phases aussi précise que la «méthode faille» : en effet, un plan non maclé constitue une condition obligatoire pour toutes les phases. Par contre, un plan maclé peut l'être par plusieurs phases; une fois maclé, il ne peut plus apporter de renseignements. La «mise à part» des macles compatibles avec un premier tenseur fait donc disparaître une partie de l'information. Par ailleurs, toutes les macles théoriquement formées au cours de deux épisodes tectoniques distincts, mais ayant un axe principal commun ($\sigma 3$ ou $\sigma 1$), sont assimilées par le processus de calcul au groupe de macles obtenues par une seule phase, caractérisée par un rapport Φ proche de 1 ($\sigma 2$ proche de $\sigma 1$) ou de 0 ($\sigma 2$ proche de $\sigma 3$). Ceci explique la nécessité de discuter les résultats en fonction de la valeur du rapport Φ. Enfin, l'analyse optique à la platine universelle ne semble pour l'instant fournir aucun argument de chronologie relative entre les divers épisodes de maclage. Notre seul moyen d'établir la chronologie relative des tenseurs obtenus a donc consisté à les comparer avec les tenseurs indépendamment reconstitués par l'analyse des failles (comme sur la figure 4).

Cependant, la remarquable cohérence des résultats pour le site de Prauthoy (fig. 4 et tableau) indique que, dans notre région d'étude, le polyphasage tectonique déduit de l'étude des macles de la calcite semble correct et fiable.

IV. – Evolution tectonique polyphasée et perturbations des contraintes régionales. Lien avec la cinématique oligocène de la zone transformante Rhin-Saône

Quand la structuration d'un bâti s'est effectuée progressivement au cours de plusieurs épisodes tectoniques successifs, la réactivation des structures héritées des épisodes antérieurs joue un rôle important dans la réorientation des trajectoires de contrainte liées aux «phases» plus récentes.

a) Permutation des contraintes $\sigma 1/\sigma 2$ et ouverture des fossés oligocènes

Le phénomène de permutation des axes de contrainte $\sigma 1$ et $\sigma 2$ a été fréquemment invoqué (sans toutefois être véritablement expliqué) pour rendre compte du passage d'un régime décrochant en compression N-S et extension E-W à un régime extensif E-W par failles normales au niveau des fossés oligocènes, donc pour justifier la bimodalité de la fracturation à leur proximité [Angelier et Bergerat, 1983; Larroque *et al.*, 1987; Larroque et Laurent, 1988]. Dans d'autres contextes, les relations décrochements-failles normales ont été également expliquées par de telles permutations [Guimera, 1984].

Cependant, un simple phénomène de permutation locale $\sigma 1/\sigma 2$ au niveau des fossés, le reste du secteur restant globalement soumis à une compression [Bergerat, 1985], ne nous semble pas acquis. La distension oligocène qui affecte le Rift ouest-européen paraît refléter un état de contrainte propre, nettement distinct de la compression N-S fini-éocène qui le précède. Ce régime extensif, probablement mis en place à la faveur d'une modification de l'orientation du vecteur mouvement relatif entre Afrique et Europe à l'Oligocène [Le Pichon *et al.*, 1988] semble généralisé, à cette époque, dans la plate-forme européenne. Il a en effet été retrouvé assez loin du Rift ouest-européen, par exemple dans le Quercy [Bonijoly et Blès; 1983; Tourneret, 1987], ou le seuil du Poitou [Vergneaud, 1987].

Les décrochements purs ou présentant une légère composante inverse (décrochements «compressifs») observés dans la région étudiée (fig. 5) sont généralement interprétés comme l'expression dans l'avant-pays d'un régime de contrainte en compression dont l'intensité s'atténue en s'éloignant des zones tectonisées [Bergerat, 1985]. Plutôt que d'imaginer une transition brutale dans le temps entre le régime de compression N-S et l'extension E-W, nous supposons l'existence d'une étape intermédiaire entre ces décrochements engendrés en contexte de compression N-S et les failles normales liées à la mise sous traction de la plaque européenne. Il s'agirait de décrochements «extensifs», engendrés en régime dominant de traction (avec donc éventuellement une légère composante normale), dont la

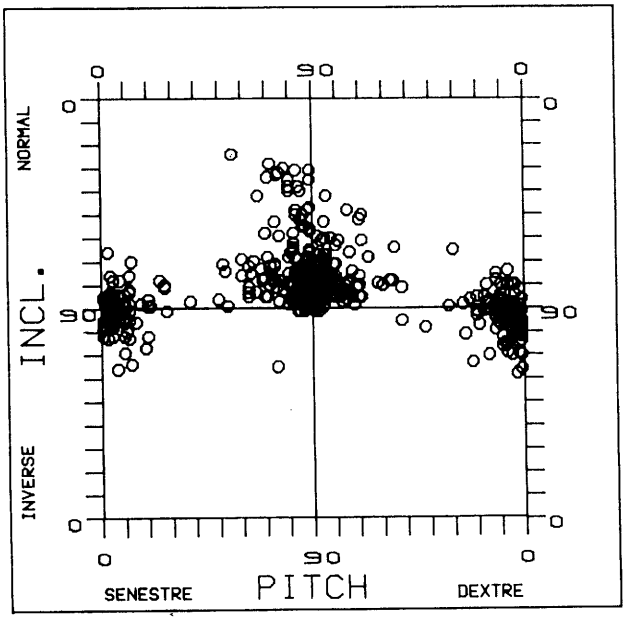

FIG. 5. – Diagramme représentant l'inclinaison (dip) en fonction du pitch pour l'ensemble des failles à stries mesurées (450) dans la plate-forme bourguignonne. Noter la répartition des failles en trois lots distincts : décrochements senestres à gauche, failles normales au centre, décrochements dextres à droite. Le pôle central correspond aux failles néoformées. La dispersion autour de ce pôle est liée à l'existence de failles héritées réactivées en failles normales.

FIG. 5. – *Diagrammatic representation of dip versus pitch for the whole set of striated microfaults measured (450) in Burgundy platform. Note the repartition of faults in three distinct sets : left-lateral strike-slip faults on the left side, normal faults in the centre, right-lateral strike-slip faults on the right side. The central pole corresponds to neoformed normal faults. Dispersion around this pole is related to the existence of inherited faults reactivated as normal faults.*

présence dans la région d'étude est mentionnée sur la figure 5. Ces décrochements pourraient être la manifestation superficielle et initiale de la mise sous traction générale de la plaque jusque-là en compression; la traction augmentant, des failles normales néoformées ou réactivées en profondeur ($\sigma 1$ vertical) se formeraient, puis se propageraient vers la surface; ces fractures associées au rejeu transformant de la faille Rhin-Saône (cf. infra) seraient à l'origine du rifting localisé aux fossés oligocènes.

Nous reconnaissons que les arguments de terrain ne permettent pas encore la mise en évidence indéniable d'un tel épisode de transition à «décrochements extensifs». Ce modèle de décrochements extensifs pourrait cependant rendre compte de l'apparition quasi-systématique de décrochements précédant un épisode d'extension (par exemple dans le golfe de Suez : Garfunkel et Bartov, [1977]). Il pourrait aussi expliquer les associations spatio-temporelles de failles normales et de décrochements dans certaines provinces en extension telles que les Basin and Range [Michel-Noël et Angelier, 1989].

b) Perturbation des trajectoires d'extension E-W (distension oligocène)

Dans la région étudiée, et en particulier dans le site de Prauthoy pris comme exemple (fig. 1, 3 et 4), l'analyse des jeux de faille et des macles de la calcite indique une direction d'extension NW-SE [Lacombe, 1989; Lacombe *et al.*, 1989a]. La direction d'extension dominante dans le Rift ouest-européen est cependant généralement proche d'E-W comme le montre la figure 6. Il semble donc que par rapport à la direction d'extension générale, l'orientation NW-SE des axes $\sigma 3$ en Bourgogne-Haute Saône (fig. 1) constitue une anomalie régionale (fig. 6).

Parmi les failles normales associées à l'épisode distensif oligocène, certaines sont d'anciens décrochements senestres compatibles avec la compression N-S éocène, réactivés en failles normales à forte inclinaison; mais la plupart sont des failles néoformées dont tant les inclinaisons que les jeux «dip-slip» (fig. 5) sont conformes au modèle des failles normales conjuguées. Or ces failles se sont formées lors de l'extension de direction NW-SE (fig. 3d), c'est-à-dire la direction «perturbée» : la perturbation régionale du $\sigma 3$ général E-W ne peut donc être attribuée à la seule réactivation à l'Oligocène de nombreux décrochements préexistants orientés 020°-040°.

Deux hypothèses nous semblent à même d'expliquer cette situation.

1) Rôle des failles bordières de la Bresse et du fossé rhénan

Une hypothèse possible est celle de la perturbation «passive» des trajectoires de $\sigma 3$ par de grandes failles de socle, héritées d'un épisode hercynien et orientées N020° à N040°, comme celles qui limitent le fossé bressan. Ces grandes failles, vraisemblablement réactivées à l'Oligocène, imposeraient au champ de contrainte une réfraction notable à leur voisinage. Toutefois, la simple présence de discontinuités anciennes, même importantes, nous semble insuffisante pour rendre compte de l'ampleur du phénomène de perturbation (obliquité d'environ 40 degrés de la direction perturbée par rapport à la direction générale, mais aussi extension régionale de la perturbation).

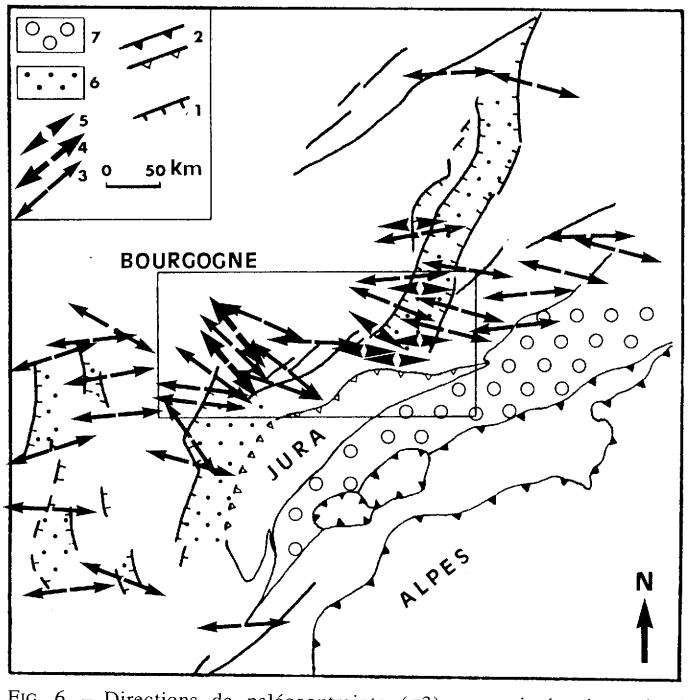

FIG. 6. – Directions de paléocontrainte ($\sigma 3$) reconstituées à partir des failles et des macles de la calcite dans l'avant-pays jurassien.
1 : failles normales (barbelures du côté affaissé); 2 : failles inverses et chevauchements; 3, 4, 5 : directions de paléocontrainte déterminées par Bergerat [1985] (3), et complétées par Lacombe [1989] (4) et Larroque et Laurent [1988] (5); 6 : fossés oligocènes; 7 : avant-fosse molassique.

FIG. 6. – *Paleostress directions ($\sigma 3$) reconstituted from faults and calcite twins in the foreland of the Jura belt.*
1 : *normal faults (with barbs on the collapsed side);* 2 : *reverse faults and thrusts;* 3, 4, 5 : *paleostress directions determined by Bergerat [1985]* (3), *completed by Lacombe [1989]* (4) *and Larroque and Laurent [1988]* (5); 6 : *Oligocene grabens;* 7 : *molassic fore-deep.*

2) Rôle de la «zone transformante» Rhin-Saône

La couverture faillée au-dessus de la faille de socle Rhin-Saône a été assimilée à une «zone transformante» fonctionnant lors de l'ouverture des fossés oligocènes de la Bresse et du Rhin [Bergerat, 1977 et 1985].

Pour des raisons de géométrie (l'orientation probable de la faille Rhin-Saône étant N060°, c'est-à-dire légèrement oblique par rapport à la direction générale d'ouverture des fossés), on est amené à supposer non pas un simple coulissement, mais un mouvement en «coulissement extensif» (fig. 7a) au cours de l'Oligocène. En terme de cinématique rigide, la direction d'ouverture étant approximativement E-W, il en résulte pour un accident dirigé N060° une composante transversale du déplacement qui atteint la moitié du déplacement total (fig. 7a). Cette importante composante transversale (NW-SE) doit être absorbée par la déformation d'ensemble. Cette hypothèse d'une extension E-W associée à une composante cisaillante générale avec ouverture très oblique est d'ailleurs corroborée par la présence de fentes de tension orientées N000°-N025°, et dont la fréquence dans

la zone de transition entre les fossés a été soulignée [Bergerat, 1985]. Ces fentes de tension très nombreuses ont pu selon nous jouer un rôle important pour absorber le déplacement dans la couverture, avec ses composantes latérale et transverse. Dans ces conditions, la «transformante» Rhin-Saône jouerait le rôle d'un relais transformant extensif entre les deux fossés oligocènes en train de s'ouvrir.

Par ailleurs, de multiples travaux ont montré que la réorientation des contraintes au voisinage d'une faille préexistante réactivée ne doit pas être négligée [Ricou, 1978; Xiaohan, 1983; Taha, 1986]. Nous proposons de considérer que les directions de σ3 NW-SE sont liées à des perturbations de la direction d'extension E-W dues au rejeu coulissant senestre à l'Oligocène de cette faille de socle (fig. 7b et 7c). Cette interprétation est, dans ses grandes lignes, conforme d'une part aux travaux de Ricou [1978] et d'autre part à ceux de Xiaohan [1983] qui a simulé par la méthode des éléments finis la perturbation d'un champ de contrainte autour d'un décrochement. Nous sommes conscients cependant que les modèles de Ricou et Xiaohan sont des modèles en contraintes horizontales en deux dimensions, donc simplifiés par rapport à la distribution réelle en trois dimensions. De plus, ces modèles considèrent le cas du cisaillement pur, c'est-à-dire sans variation de surface, alors que la zone transformante étudiée présente un écartement et donc une augmentation de surface dans un contexte nettement en extension. On peut alors se demander si ces modèles restent entièrement applicables dans un contexte extensif (combinaison décrochements/failles normales). C'est donc à titre d'hypothèse que nous proposons de considérer que les perturbations de contraintes dans un modèle de coulissement extensif peuvent être représentées en termes de direction de la contrainte compressive minimale σ3 par un schéma du type de la figure 7, en attendant que des modèles plus élaborés soient disponibles.

Il est important de noter que la direction de la contrainte compressive maximale σ1 liée à la compression N-S fini-Eocène ne paraît pas notablement perturbée à proximité de cette grande discontinuité (fig. 1). De plus, la nécessité d'un écartement des lèvres de la transformante Rhin-Saône lors de l'extension oligocène (fig. 7a) est incompatible avec une permanence régionale significative de la compression N-S pendant l'épisode de rifting. Ceci incite à penser que la zone de faille Rhin-Saône n'a pas été active (ou peu) lors de la compression N-S à l'Eocène supérieur, et que son activité principale a eu lieu à l'Oligocène. Il s'ensuit que les décrochements N040° interprétés comme des cisaillements de Riedel dans la couverture au-dessus d'un décrochement profond [Bergerat, 1977] sont, au moins en partie, d'âge oligocène.

A l'issue de cette discussion, nous proposons deux hypothèses de travail qu'il conviendra de préciser par des études ultérieures :

1) les déviations de contrainte observées, et leur ampleur peuvent être expliquées par un modèle de «zone transformante en extension» (fig. 7a) entre les fossés oligocènes de la Bresse et du Rhin;

2) certains décrochements rapportés à l'épisode de compression N-S pourraient correspondre en réalité à des décrochements «extensifs» et constitueraient l'étape intermédiaire entre la compression N-S (décrochements compressifs) et l'extension oligocène (failles normales). Il

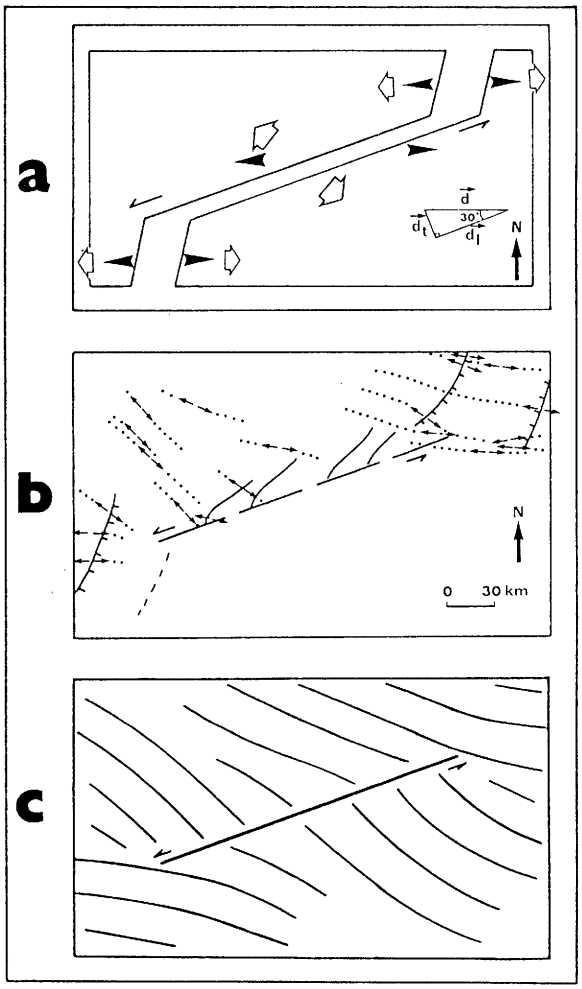

FIG. 7. – Perturbations des trajectoires de la contrainte σ3 dans la zone de relais entre les fossés oligocènes de la Saône et du Rhin et modèle interprétatif de la cinématique de la zone transformante Rhin-Saône.
a : modèle interprétatif de la cinématique en «zone transformante en extension» de la faille Rhin-Saône. Les flèches noires indiquent les directions d'ouverture, les larges flèches blanches les directions d'extension. Le vecteur déplacement total $\vec{d}$ se décompose en un vecteur déplacement transversal $\vec{d_t}$ et un vecteur déplacement latéral $\vec{d_l}$.
b : trajectoires de σ3 reconstituées par l'analyse des failles et des macles de la calcite à proximité de la transformante Rhin-Saône. Les petites flèches correspondent aux directions de la contrainte σ3 déterminées dans les divers sites d'étude. Les pointillés représentent les trajectoires probables correspondantes.
c : modèle de perturbations des directions de la contrainte σ3 à proximité d'un décrochement, adapté d'après Ricou [1978] et Xiaohan [1983].

FIG. 7. – *Perturbations of the minimal stress σ3 trajectories between the Saône and the Rhine grabens and interpretative kinematic model of the Rhin-Saône transform zone.*
a : *interpretative kinematic model of the extensional Rhine-Saône transform zone. Black arrows indicate directions of divergence (movement), large white arrows indicate directions of extension (stress). The vector* $\vec{d}$ *(total motion) can be decomposed into a vector* $\vec{d_t}$ *(transversal motion) and a vector* $\vec{d_l}$ *(lateral motion).*
b : *σ3 trajectories reconstructed from fault slip and calcite twin analysis near the Rhine-Saône transform zone. Small arrows correspond to the direction of the minimal stress σ3; dashed lines represent corresponding stress trajectories.*
c : *model of stress σ3 perturbations close to a strike-slip fault, adapted from Ricou [1978] and Xiaohan [1983].*

pourrait en être de même pour les décrochements antérieurs aux failles normales affectant certains terrains oligocènes du fossé rhénan [Larroque et Laurent, 1988].

V. – Conclusion

La distribution générale des états de contrainte dans les plates-formes, et notamment dans la plate-forme ouest européenne, est maintenant bien connue depuis les travaux régionaux de Arthaud et Choukroune [1972]; De Charpal *et al.* [1974]; Letouzey et Trémolières [1980]; Trémolières [1981]; Bergerat [1985 et 1987]; Letouzey [1986]. En effet, l'étude des populations de jeux de faille a permis l'établissement de cartes des trajectoires générales des paléo-contraintes. Cependant, la maîtrise d'une méthodologie associant deux échelles d'investigation (failles et macles de la calcite) permet d'accéder à un réseau d'observation beaucoup plus fin. A l'issue de l'étude menée sur la plate-forme bourguignonne, il semble en effet que les failles et les macles soient contemporaines à l'échelle géologique, et que la notion de tenseur moyen soit justifiée de l'échelle kilométrique à l'échelle centimétrique [Lacombe, 1989; Lacombe *et al.*, 1989a et b]; avec les macles de la calcite, il sera donc possible de déterminer des tenseurs de contrainte ponctuels, et par là-même d'aborder très précisément le problème des déviations de contrainte. La combinaison systématique des deux méthodes constitue actuellement l'outil le plus performant pour relier l'observation générale (corrélable avec la cinématique des plaques) à l'observation de détail (corrélable avec la fracturation à toutes ses échelles).

Enfin, la reconstitution précise des trajectoires de contraintes et de leurs perturbations permettra de bien comprendre la géométrie et le mécanisme de fonctionnement de la zone transformante Rhin-Saône. La modélisation approfondie d'un tel système transformant (cinématique, perturbations de contrainte) exigera cependant une simulation en trois dimensions par éléments distincts, car le raisonnement en contraintes planes, applicable aux cisaillements purs, est imparfait en contexte extensif (décrochements/failles normales).

Remerciements. – Travail effectué dans le cadre du GS Tethys. Nous remercions A. Etchecopar et un rapporteur anonyme pour leurs critiques constructives du manuscrit.

Références

Angelier J. (1984). – Tectonic analysis of fault slip data sets. – *J. Geophys. Res.*, Washington, 89, B7, pp. 5835-5848.

Angelier J. (1989). – From orientation to magnitudes in paleostress determinations using fault slip data. – *J. Struct. Geol.*, Londres, 11, pp. 37-50.

Angelier J. & Bergerat F. (1983). – Systèmes de contraintes et extension intracontinentale. – *Bull. Centres Rech. Explor. Prod. Elf Aquitaine*, Pau, 7, 1, pp. 137-147.

Angelier J., Colletta B. & Anderson R.E. (1985). – Neogene paleostress changes in the Basin and Range : a case study at Hoover Dam, Nevada-Arizona. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, Boulder, 96, pp. 347-361.

Angelier J. & Manoussis S. (1980). – Classification automatique et distinction des phases superposées en tectonique de failles. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, II, 290, pp. 651-654.

Armijo R. & Cisternas A. (1978). – Un problème inverse en microtectonique cassante. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 287, pp. 595-598.

Arthaud F. & Choukroune P. (1972). – Méthode d'analyse de la tectonique cassante à l'aide des microstructures dans les zones peu déformées. Exemple de la plate-forme nord aquitaine. –*Revue IFP*, Paris, 27, 5, pp. 715-737.

Bergerat F. (1977). – La fracturation de l'avant-pays jurassien entre les fossés de la Saône et du Rhin. Analyse et essai d'interprétation dynamique. – *Rev. Géog. phys. Géol. dyn.*, Paris, (2), XIX, 4, pp. 325-338.

Bergerat F. (1985). – Déformations cassantes et champs de contrainte tertiaires de la plate-forme carbonatée européenne. – Thèse de Doctorat ès Sciences. – *Mém. Sci. Terre, Univ. P. et M. Curie*, n° 85-07, Paris, 315 p.

Bergerat F. (1987). – Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision. – *Tectonics*, Washington, 6, pp. 99-132.

Bonijoly D. & Bles J.L. (1983). – Histoire tectonique du Quercy (bordure NE du bassin d'Aquitaine, France). Géométrie, cinématique et chronologie des déformations cassantes. – *Bull. Soc. Géol. Fr.*, Paris, (7), XXV, pp. 775-783.

Carey E. & Brunier B. (1974). – Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 279, pp. 891-894.

De Ccharpal O., Tremolières P., Jean F. & Masse P. (1974). – Un exemple de tectonique de plate-forme : les Causses majeures (sud du Massif central, France). – *Revue IFP*, Paris, 29, 5, pp. 641-659.

Etchecopar A. (1984). – Etude des états de contrainte en tectonique cassante et simulation de déformations plastiques (approche mathématique). – Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 270 p.

Etchecopar A. & Mattauer M. (1988) – Méthodes dynamiques d'analyse des populations de failles. – *Bull. Soc. Géol. Fr.*, Paris, 8, IV, 2, pp. 289-302.

Etchecopar A., Vasseur G. & Daignières M. (1981). – An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis. – *J. Struct. Geol.*, Londres, 3, pp. 51-65.

Garfunkel Z. & Bartov Y. (1977). – The tectonics of Suez rift. – *Bull. géol. Surv. Israel*, Jérusalem, 71, pp. 1-44.

Guimera J. (1984). – Paleogene evolution of deformation in the northeastern Iberian Peninsula. – *Geol. Mag.*, Cambridge, 121, 5, pp. 413-420.

Lacombe O. (1989). – Analyse des méthodes de reconstruction des paléo-contraintes aux échelles macroscopique et microscopique. Application à la reconstitution de l'histoire tectonique de la plate-forme bourguignonne. – D.E.A. inédit, Univ. P. et M. Cu-

rie, Paris, 55 p. (en dépôt à la bibliothèque de recherche de l'Université P. et M. Curie et à la Société géologique de France).

LACOMBE O., ANGELIER J., LAURENT Ph., BERGERAT F. & TOURNERET Ch. (1989a). – Contribution de l'analyse des macles de la calcite à la connaissance de l'histoire tectonique d'une région : l'exemple de la plate-forme carbonatée bourguignonne. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 309, II, pp. 1979-1984.

LACOMBE O., ANGELIER J., LAURENT Ph., BERGERAT F. & TOURNERET Ch (1989b). – Analyse des paléocontraintes en domaine de plate-forme (tectonique cassante et macles de la calcite) : un exemple en Bourgogne. – Soc. Géol. France, Séance spécialisée *Téthys*, Paris, 12/13 Décembre 1989, volume des résumés, p. 20.

LACOMBE P., ANGELIER J., LAURENT Ph., BERGERAT F. & TOURNERET Ch. (1990). – Joint analyses of calcite twins and fault slips as a key to decipher polyphase tectonics : Burgundy as a case study. – *Tectonophysics*, Amsterdam (sous presse).

LARROQUE J.M., ETCHECOPAR A. & PHILIP H. (1987). – Evidence for the permutation of stresses $\sigma 1$ et $\sigma 2$ in the Alpine foreland : the Rhine graben example. – *Tectonophysics*, Amsterdam, 144, pp. 315-322.

LARROQUE J.M. & LAURENT Ph. (1988). – Evolution of the stress field pattern in the south of the Rhine graben from the Eocene to the present. – *Tectonophysics*, Amsterdam, 148, pp. 41-58.

LAURENT Ph. (1984). – Les macles de la calcite en tectonique : nouvelles méthodes dynamiques et premières applications. – Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 324 p.

LAURENT Ph., BERNARD Ph., VASSEUR G. & ETCHECOPAR A. (1981). – Stress tensor determination from the study of e twins in calcite : a linear programming method. – *Tectonophysics*, Amsterdam, 78, pp. 651-660.

LAURENT Ph., TOURNERET Ch. & LABORDE O. (1990). – Determining deviatoric stress tensors from calcite twins. Application to monophased synthetic and natural polycrystals. – *Tectonics*, (sous presse).

LE PICHON X., BERGERAT F. & ROULET M.J. (1988). – Plate kinematics and tectonics leading to Alpine belt formation : a new analysis. – *Geol. Soc. Amer. spec. pap.*, Processes in continental lithospheric deformation, pp. 111-131.

LETOUZEY J. (1986). – Cenozoic paleo-stress pattern in the Alpine foreland and structural interpretation in a platform basin. – *Tectonophysics*, Amsterdam, 132, pp. 215-231.

LETOUZEY J. & TRÉMOLIÈRES (1980). – Paleostress fields around the Mediterranean since the Mesozoic derived from microtectonics; comparisons with plate tectonic data. *In* : Géologie des chaînes alpines issues de la Téthys. – 26e C.G.I., Paris. – *Mém. BRGM*, 115, pp. 261-273.

MICHEL-NOËL G. & ANGELIER J. (1989). – Formation des bassins en extension : comparaison de deux ensembles dans le Basin and Range, USA. – *Bull. Soc. Géol. Fr.*, Paris, (8), V, 3, pp. 523-532.

RICOU L.E. (1978). – Accidents régulateurs de contrainte et réorientation de contrainte. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, 286, pp. 1657-1660.

TAHA M. (1986). – Apport de la microtectonique au problème des trajectoires de contraintes et de leurs perturbations (exemple du nord de Montpellier). – Thèse de Doctorat ès Sciences, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 155 p.

TOURNERET Ch. (1987). – Détermination du tenseur des contraintes tectoniques par les macles de la calcite. Mise au point d'une méthode automatique de mesures. –D.E.A. inédit, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 50 p.

TOURNERET Ch. & LAURENT Ph. (1990). – Paleostress orientations from calcite twins in the north pyrenean foreland, by the Etchecopar inverse method. – *Tectonophysics*, (sous presse).

TRÉMOLIÈRES P. (1981). – Mécanismes de la déformation en zones de plate-forme : méthode et application au bassin de Paris. – *Revue IFP*, Paris, 36, 4, pp. 395-428 et 5, pp. 579-593.

TULLIS T.E. (1980). – The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitudes. – *J. Geophys. Res.*, Washington, 85, pp. 6263-6268.

VERGNEAUD M. (1987). – Fracturation et interactions socle-couverture : le seuil du Poitou. Données géologiques et de la télédétection infrarouge thermique. – Thèse de Doctorat, Univ. Poitiers, 200 p.

XIAOHAN L. (1983). – (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 de 3e cycle, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 152 p.