

Magnitude de la contrainte déviatorique pyrénéenne dans l'avant-pays nord-pyrénéen

Olivier Lacombe, Philippe Laurent et Muriel Rocher

C.R. Acad. Sci. Paris,
t. 322, série II a,
p. 229 à 235,
1996

M. R. et O. L. : Laboratoire
de Tectonique Quantitative,
Université Pierre-et-Marie-Curie,
Tour 26-25, 1^{er} étage,
Boîte 129, 4, place Jussieu
75252 Paris Cedex 05, France ;

P. L. : Laboratoire de Tectonique
et Géophysique,
Université des Sciences
et Techniques du Languedoc,
place Eugène-Bataillon,
34095 Montpellier Cedex 05,
France.

Résumé Ce travail constitue un essai préliminaire de détermination de la magnitude de la contrainte déviatorique majeure pyrénéenne dans l'avant-pays nord-pyrénéen. Nos résultats, fondés sur l'analyse des failles et des macles de la calcite, suggèrent que cette contrainte déviatorique, horizontale et subméridienne, décroît quand on s'éloigne du front de la chaîne, depuis 60-70 MPa au pied des Pyrénées jusqu'à environ 20-30 MPa dans le bassin de Paris. Ces valeurs, qui correspondent certainement à la valeur maximum de l'ensemble des déviateurs tectoniques appliqués au cours de l'orogénèse pyrénéenne d'âge Éocène, sont discutées et comparées aux résultats obtenus dans l'avant-pays des Appalaches et aux données récentes sur la distribution des contraintes lithosphériques actuelles.

Mots-clés : Failles, Macles de la calcite, Contrainte déviatorique, Orogenèse pyrénéenne, France.

Abstract **Magnitude of the Pyrenean deviatoric stress in the north Pyrenean foreland**

This Note is a preliminary attempt to determine the magnitude of the major deviatoric stress related to the Pyrenean compression in the northern foreland of the Pyrenees collision belt. Our results, based on a combined analysis of fault slip and calcite twin data, suggest that this deviatoric stress, horizontal and submeridian, decreases northwards, from 60-70 MPa near the Pyrenees to about 20-30 MPa in the Paris basin. These values probably correspond to the maximum values of the tectonic deviators applied during the Eocene Pyrenean orogeny. They are discussed and compared with the results obtained in the Appalachian foreland and with recent data on the distribution of present-day lithospheric stresses.

Keywords: Faults, Calcite twins, Deviatoric stress, Pyrenean orogeny, France.

Abridged English Version **I. AIM OF THE STUDY**

THIS study is a preliminary attempt to describe the magnitude of the major deviatoric stress related to the Pyrenean compression. This kind of work greatly differs from previous tectonic syntheses which focused on stress orientations without taking into account stress magnitudes. This new approach has been made possible by the recent improvements of methods for calcite twin analysis, allowing reconstruction of palaeostresses in orientation and *pro parte* in magnitude (Laurent, 1984; Etchecopar, 1984; Laurent *et al.*, 1990).

II. DIFFICULTIES OF THIS KIND OF STUDY

We conducted our study in the north Pyrenean foreland, where numerous regional

works have documented the structures and the stress orientations related to the Pyrenean orogeny (Arthaud, *in* Mattauer and Mercier, 1980; Burg and Etchecopar, 1980; Gaviglio, 1985; Letouzey, 1986; Bergerat, 1987; Etchecopar and Mattauer, 1988; Bles *et al.*, 1989; Tournèret and Laurent, 1990; Lacombe *et al.*, 1992; Petit and Mattauer, 1995). However, several states of stress prevailed during the "Pyrenean" phase, from Late Cretaceous to Late Eocene, so that the stress tensors retained for this study are probably not perfectly contemporaneous.

III. PRINCIPLE OF THE STUDY

The Pyrenean compression has been unambiguously identified in southern France,

Note

présentée par
Jean Aubouin.

remise le 19 juin 1995,
acceptée après révision
le 13 novembre 1995.

where tertiary formations allow stratigraphic dating of compressional features. To the North, in the Mesozoic formations of the foreland platform, the Pyrenean compression has been recognized based on both the attitude of the principal stress σ_1 (horizontal and submeridian) and the relative chronology between the successive tectonic events (Oligocene extension, *e.g.*, Bergerat, 1987).

The location of the sites investigated is presented in figure 1: Site 1: Vic Billh (Tourneret, 1990); Site 2: Pas de l'Escalette (Tourneret and Laurent, 1990); Site 3: Castries (Tourneret, 1990); Site 4: Plateau du Cengle/Pont de Bayeux (Paris *et al.*, 1975; Lacombe *et al.*, 1991); Site 5: Vallée du Lot (Tourneret and Laurent, 1990); Site 6: La Fage (Tourneret, 1990); Site 7: Givry (this work); Site 8: Talant (Lacombe, 1992); Site 9: Gv (Lacombe, 1992); Site 10: Seuchey (Lacombe, 1992); Site 11: Dorans (Larroque, 1987); Site 12: Sacquenay (Lacombe, 1992); Site 13: Château-Thierry (Lacombe *et al.*, 1994); Site 14: Les Justices (Tourneret, 1990). In these sites, the stress tensors related to the Pyrenean compression were determined using fault slip data [reduced stress tensors: orientations of σ_1 , σ_2 , σ_3 and Φ ratio: $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, $1 \geq \Phi \geq 0$] and calcite twin data [deviatoric stress tensors: orientations of σ_1 , σ_2 , σ_3 and differential stress magnitudes ($\sigma_1 - \sigma_3$) and ($\sigma_2 - \sigma_3$)].

Because of the lack of control on the lithostatic stress and the mean stress P , we chose to compare for each site the deviatoric component of σ_1 , $\sigma_1 D$:

$$\sigma_1 D = \sigma_1 - P = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Using calcite twins, differential stress magnitudes are directly calculated, so that $\sigma_1 D$ is easily determined:

$$\sigma_1 D = \frac{1}{3} [2(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_2 - \sigma_3)]$$

IV. RESULTS

Figure 2 reports the magnitude of $\sigma_1 D$ in each site as a function of the distance of the site to the orogenic front. Vertical bars are not error bars, but correspond to the range of values obtained in a given site from several samples. Despite uncertainties, the curve shows a northwards decreasing magnitude of

$\sigma_1 D$. The decrease appears to be rapid near the Pyrenees and slight in the foreland, suggesting an exponential decrease rather than a linear one. These results are mapped as isovalue curves of $\sigma_1 D$ in figure 3.

V. DISCUSSION AND CONCLUSION

The sources of uncertainties in our results are numerous. Methodological uncertainties concern for instance the determination of the Φ ratio, the calculation of differential stress magnitudes based on the yield stress value for twinning which is grain size dependent, or the separation of superposed tectonic events. Geological uncertainties mainly consist of stress instabilities due to lithological and structural inhomogeneities, leading to stress perturbations in both orientation and magnitude (*e.g.*, site 14, where sampling was carried out near the Meyssac fault). Consequently, we have to keep in mind that we can only propose orders of magnitude for Eocene stresses in the European platform.

The northward decreasing magnitude of $\sigma_1 D$ from the Pyrenean orogenic front is similar to the decrease of differential stresses in the Appalachian foreland (Craddock *et al.*, 1993), especially on the 0-700 km range where both the magnitudes and the dispersal are comparable. The part of the foreland recording the Pyrenean stresses therefore extends far away from the orogenic front, at least 700 km (1,700 km from the Appalachians).

The north Pyrenean foreland also displays a variation in the style of compressional features, from the association of folds, reverse and strike-slip faulting near the Pyrenees, indicating large deformation, to a northern domain where deformation is marked only by stylolites and calcite twins (fig. 4). This northward decreasing deformation cannot be directly related to the decreasing magnitude of $\sigma_1 D$, because other parameters, such as burial depth or inherited tectonic history also influence the way the deformation is accommodated within the crust.

Our results are also consistent with the present-day intraplate stress patterns (Zoback, 1992), which generally display homogeneous principal stress orientations, but also local permutations of principal stress axes (reverse and

strike-slip fault regimes) and perturbations of orientation and magnitude of σ_{1D} due to local effects (e.g., collision). We propose that the nearly N-S to N020° homogeneous orientation of σ_1 in the Pyrenean foreland is related to the simple, linear shape of the Iberia-

Europa collisional boundary (in contrast to the Alpine chain), and that the reconstructed decreasing magnitude of σ_{1D} results from the superposition of local collisional stresses on nearly constant intraplate stresses mainly reflecting the plate-driving forces.

I. BUT DE L'ÉTUDE

Notre étude constitue un premier essai de caractérisation de la magnitude de la contrainte déviatorique majeure pyrénéenne d'âge Éocène dans l'avant-pays nord-pyrénéen. Ce type d'analyse diffère grandement des seules synthèses « directionnelles » effectuées jusqu'alors, limitées à cette approche par manque d'information sur les magnitudes des contraintes. Certains travaux antérieurs (compilation dans Lacombe et Laurent, 1992) abordaient déjà le problème de la quantification des contraintes, mais dans des contextes ponctuels et très variés. Par ailleurs, le développement récent des méthodes de détermination des paléocontraintes (en orientation et *pro parte* en magnitude) fondée sur l'analyse des macles de la calcite (Laurent, 1984 ; Etchecopar, 1984 ; Laurent et al., 1990) nous permettaient d'aborder sous un angle nouveau le problème délicat des grandeurs des contraintes.

II. LES DIFFICULTÉS D'UNE TELLE ÉTUDE

Nous avons conduit notre étude dans l'avant-pays nord-pyrénéen, où de nombreux travaux régionaux étaient disponibles (Arthaud, in Mattauer et Mercier, 1980 ; Burg et Etchecopar, 1980 ; Gaviglio, 1985 ; Letouzey, 1986 ; Bergerat, 1987 ; Etchecopar et Mattauer, 1988 ; Bles et al., 1989 ; Tourneret et Laurent, 1990 ; Lacombe et al., 1992 ; Petit et Mattauer, 1995). Cependant, le revers de cette multitude de travaux a été la difficulté du choix des sites et des données à retenir pour cette étude. En effet, plusieurs de ces travaux (Gaviglio, 1985 ; Etchecopar et Mattauer, 1988 ; Lacombe et al., 1992 ; Arthaud et Laurent, 1995) ont montré que, depuis le Crétacé supérieur jusqu'à l'Éocène supérieur, des états de contraintes décro-

chants et compressifs s'étaient succédé au cours de la phase pyrénéenne. Ainsi, quoique tous les tenseurs présentés dans cette étude soient attribuables globalement à la compression pyrénéenne, il n'est pas certain qu'ils soient parfaitement contemporains.

III. PRINCIPE DE L'ÉTUDE

La compression pyrénéo-provençale d'âge Éocène a été identifiée sans ambiguïté en Languedoc et en Provence, où la présence de terrains tertiaires a permis une datation stratigraphique des structures. Plus

Fig. 1 Directions de paléocontraintes reconstituées à l'aide des failles et des macles de la calcite dans l'avant-pays nord-pyrénéen pour la compression pyrénéenne d'âge Éocène. Les chiffres 1 à 14 désignent les sites d'étude. Sites marqués d'un carré : stations où les données de failles et de macles de la calcite sont disponibles. Sites marqués d'un point : stations où seules les données de macles sont disponibles.

Palaeostress orientations deduced from fault slip and calcite twin analyses in the north Pyrenean foreland for the Eocene Pyrenean compression. Numbers 1 to 14 refer to the sites investigated. Squares: sites where calcite twin and fault slip data are available; Points: sites where only calcite twin data are available.



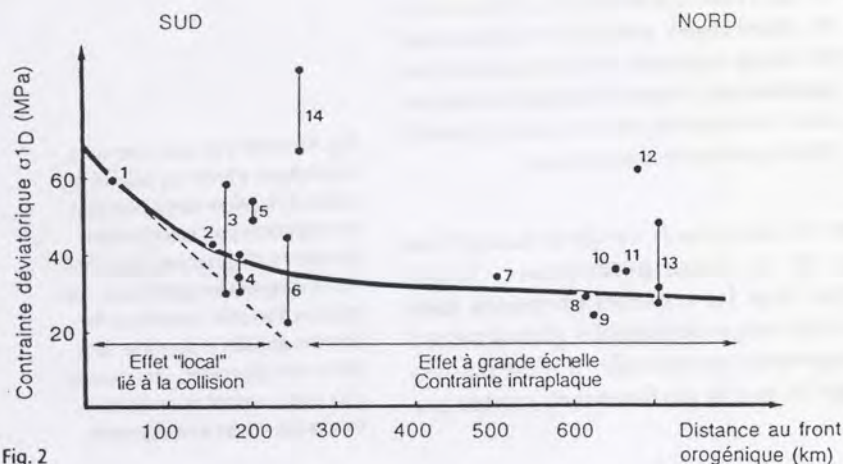


Fig. 2

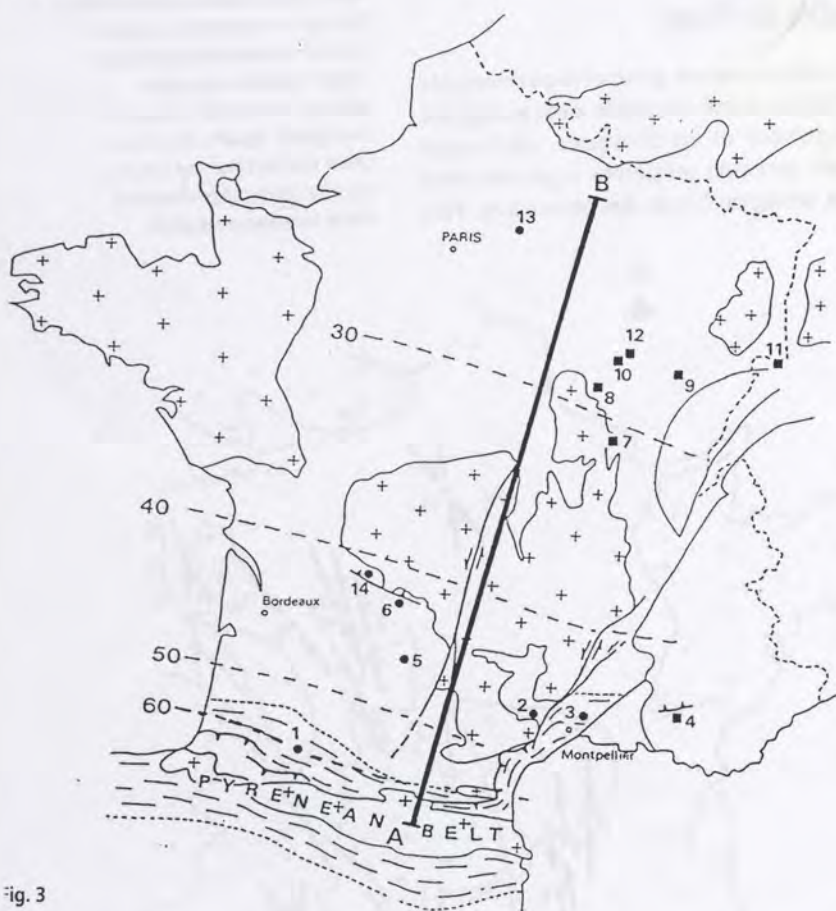


Fig. 3

au Nord, dans les terrains secondaires de la plate-forme, la compression pyrénéenne a été identifiée comme telle, en raison de l'orientation subméridienne et horizontale de la contrainte principale majeure σ_1 , et

sur la base d'arguments de chronologie relative entre les différents épisodes tectoniques (l'extension oligocène, *e.g.*, Bergerat, 1987).

Les sites d'étude sont localisés sur la figure 1 [Site 1 : Vic Billh (Tourneret, 1990) ; Site 2 : Pas de l'Escalette (Tourneret et Laurent, 1990) ; Site 3 : Castries (Tourneret, 1990) ; Site 4 : Plateau du Cengle/Pont de Bayeux (Paris *et al.*, 1975 ; Lacombe *et al.*, 1991) ; Site 5 : Vallée du Lot (Tourneret et Laurent, 1990) ; Site 6 : La Fage (Tourneret, 1990) ; Site 7 : Givry (ce travail) ; Site 8 : Talant (Lacombe, 1992) ; Site 9 : Gy (Lacombe, 1992) ; Site 10 : Seuchey (Lacombe, 1992) ; Site 11 : Dorans (Larroque, 1987) ; Site 12 : Sacquenay (Lacombe, 1992) ; Site 13 : Château-Thierry (Lacombe *et al.*, 1994) ; Site 14 : Les Justices (Tourneret, 1990)]. Dans ces sites, les tenseurs « pyrénéens » ont été déterminés à l'aide des failles [tenseurs réduits : orientations de σ_1 , σ_2 , σ_3 et rapport $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$, $1 \geq \Phi \geq 0$] et des macles de la calcite [tenseurs déviatoriques : orientations de σ_1 , σ_2 , σ_3 et grandeurs des contraintes différentielles ($\sigma_1 - \sigma_3$) et ($\sigma_2 - \sigma_3$)]. Les estimations de magnitudes à l'aide des macles de la calcite sont inédites (site 7), extraites directement des travaux cités (sites 1, 2, 3, 5, 6, 11, 14) ou proviennent de nouveaux traitements plus précis (sites 4, 8, 9, 10, 12, 13). Les résultats obtenus dans le site 7 ne seront cependant pas détaillés ici, le principe de l'analyse des macles ayant déjà été présenté (Laurent, 1984 ; Tourneret et Laurent, 1990).

Pour une comparaison effective des grandeurs de la contrainte « pyrénéenne », et afin de s'affranchir autant que possible de l'influence de la paléo-profondeur d'enfouissement, et plus généralement de la pression isotrope $P = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) / 3$, souvent mal contrôlées, nous avons choisi d'analyser seulement les différentes valeurs de la composante déviatorique de σ_1 , σ_{1D} :

$$\sigma_{1D} = \sigma_1 - P = \sigma_1 - \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3}$$

Les valeurs des contraintes différentielles ($\sigma_1 - \sigma_3$) et ($\sigma_2 - \sigma_3$) étant déterminées directement par les macles de la calcite pour



Fig. 4

chaque épisode tectonique, il est facile de calculer σ_1D :

$$\sigma_1D = \frac{1}{3} [2(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_2 - \sigma_3)]$$

IV. RÉSULTATS

Nous avons reporté la grandeur de σ_1D dans chaque site d'étude en fonction de la distance de ce site au front des Pyrénées (fig. 2), en précisant l'intervalle de variation de cette grandeur, quand plusieurs estimations étaient disponibles (barres verticales). La courbe obtenue indique globalement une décroissance de σ_1D en s'éloignant du front de la chaîne, depuis 60-70 MPa au pied des Pyrénées jusqu'à 20-30 MPa dans le bassin de Paris. Cette décroissance, rapide à proximité des Pyrénées, puis moins importante dans l'avant-pays, « semble » plutôt exponentielle

que linéaire (fig. 3), bien que la dispersion des données et les incertitudes sur les résultats ne permettent pas de conclure de façon certaine. Cette décroissance est illustrée cartographiquement à la figure 3, où sont représentées les courbes d'iso-valeurs de σ_1D .

V. DISCUSSION ET CONCLUSION

Les sources d'incertitude sur les résultats sont diverses, et malheureusement nombreuses. Elles sont principalement de deux types : méthodologiques et géologiques.

Les incertitudes méthodologiques, déjà décrites (Laurent, 1984 ; Tourneret, 1990 ; Lacombe, 1992), portent par exemple sur la détermination du rapport Φ , qui dépend fondamentalement de la population de microstructures prises en compte (fabrication,

Fig. 2 Valeur de la contrainte déviatorique σ_1D en fonction de la distance au front des Pyrénées (voir transect de la figure 3). Les segments verticaux ne sont pas des barres d'erreur, mais les intervalles de variation de la grandeur de σ_1D quand plusieurs estimations sont disponibles dans le même site.

Value of the deviatoric stress σ_1D as a function of the distance to the Pyrenean front. Vertical bars are not error bars, but correspond to the range of values obtained from different samples in the same site.

Fig. 3 Représentation des courbes d'iso-valeur de la contrainte σ_1D dans l'avant-pays nord-pyrénéen à l'Éocène. A-B désigne le transect ayant servi à construire la courbe de la figure 2.

Iso-value curves of the deviatoric stress σ_1D in the north Pyrenean foreland for the Eocene compression. A-B corresponds to the cross-section of figure 2.

Fig. 4 Représentation des domaines de l'avant-pays nord-pyrénéen où la déformation est dominée par l'association plis/chevauchements/failles inverses/décrochements (1), par des décrochements (2) et par des stylolites et des macles de la calcite (3).

Map of domains of the north pyrenean foreland where deformation mainly corresponds to folds/thrusts/reverse and strike-slip faults (1), strike-slip faults (2) and stylolites and calcite twins only (3).

contemporanéité, échelle,...), sur le calcul direct de $\sigma_1 D$ par les macles, fondé sur la valeur du seuil de maclage, qui n'est pas tout à fait constante et dépend de la taille des grains et probablement de l'hétérogénéité de ceux-ci (impuretés,...) ou encore sur la séparation de tenseurs superposés. Les incertitudes géologiques englobent les variations spatio-temporelles du champ de contraintes dues aux hétérogénéités lithologiques et/ou structurales, qui peuvent se traduire par des perturbations des orientations comme des grandeurs des contraintes. C'est le cas dans le site 14, situé à proximité immédiate de la faille de Meyssac : les fortes valeurs de $\sigma_1 D$ ne doivent pas être prises en compte dans nos estimations, car elles reflètent davantage une concentration locale des contraintes que le champ régional. Les autres incertitudes portent sur l'âge « pyrénéen » de la compression submérienne (les microstructures n'étant pas toujours datées stratigraphiquement, on ne peut exclure une contribution « alpine » à cette compression).

Dans l'état actuel de nos connaissances, il est donc illusoire de vouloir proposer des valeurs précises des grandeurs des contraintes ; tout au plus peut-on, comme dans cet essai, avancer des ordres de grandeur probables pour les contraintes qui ont affecté la plate-forme européenne à l'Éocène. Il est satisfaisant de constater que ces ordres de grandeur (quelques dizaines de mégapascals) sont proches de ceux prédits par les modèles de contraintes intraplaques (e.g., Solomon *et al.*, 1980).

La décroissance de $\sigma_1 D$ en s'éloignant des Pyrénées est similaire à celle des contraintes différentielles dans l'avant-pays des Appalaches (Craddock *et al.*, 1993). Ceci est particulièrement clair dans l'intervalle d'étude commun (0-700 km), sur lequel à la fois les grandeurs reconstituées et la dispersion observée sont comparables. Nos résultats confirment également que la zone d'avant-pays enregistrant les contraintes tectoniques s'étend au moins sur 700 km à partir du front actuel de la chaîne. La sensibilité du maclage à la contrainte (seuil de maclage : environ 10 MPa) laisse supposer que la compression submérienne (« pyréné-

enne ») a pu être enregistrée et « fossilisée » encore plus loin du front orogénique (la compression appalachienne a été enregistrée à 1 700 km du front : Craddock *et al.*, 1993).

On observe également une zonation vers le Nord des régimes tectoniques et du style des déformations pyrénéennes (Lacombe et Laurent, 1991), depuis l'association plis/chevauchements/décrochements et failles inverses au Sud, symptomatique d'une importante déformation, jusqu'à l'association stylolites et macles de la calcite au Nord, indiquant une déformation beaucoup plus faible (fig. 4). Cependant, la décroissance de $\sigma_1 D$ n'est pas directement superposable et corrélable avec le type de déformation observé : d'autres paramètres, comme la profondeur d'enfouissement ou encore l'héritage structural jouent également un rôle important dans l'adaptation de la déformation imposée aux limites.

Nos résultats pourront par la suite être confrontés et éprouvés par des mesures de contraintes actuelles dans l'avant-pays des chaînes de montagnes actives comme l'Himalaya, où Tapponnier *et al.* (1986) ont caractérisé un champ de contrainte cohérent et homogène sur plus de 1 000 km en Asie centrale. Les données déjà disponibles concernant les contraintes lithosphériques actuelles (e.g., Zoback, 1992) montrent des similitudes avec ce que nous avons obtenu ou supposé pour le « pyrénéen » : (1) cohérence des directions principales de contraintes à grande échelle, en relation probablement avec le vecteur instantané de déplacement de la plaque lithosphérique concernée, (2) variations locales des tenseurs déterminés (régimes décrochants et compressifs) liées à des perturbations locales, (3) variations quelquefois importantes de l'orientation et de la grandeur de $\sigma_1 D$, par exemple en contexte de collision, en relation essentiellement avec la géométrie de la frontière collisionnelle. Dans ce contexte, la bonne cohérence directionnelle autour de N-S à N020° de l'orientation de σ_1 au pyrénéen pourrait être liée à la géométrie simple, quasi-rectiligne de la frontière de collision Ibérie-Europe, par contraste avec la

répartition en éventail des orientations de σ_1 au front des Alpes (Bergerat, 1987). Les valeurs de $\sigma_1 D$ pourraient résulter de la superposition d'une forte contrainte locale liée à la collision, avec une décroissance rapi-

de vers le Nord, et d'une contrainte compressive intraplaque, sub-constante à grande échelle (20-30 MPa), liée aux forces motrices à l'origine du déplacement des plaques (fig. 2).

Remerciements : Les auteurs remercient J. Garcia de l'USTL pour sa contribution à la réalisation des figures.

- ARTHAUD, F. et LAURENT, P., 1995. Contraintes, déformation et déplacement dans l'avant-pays nord-pyrénéen du Languedoc méditerranéen (sous presse).
- BERGERAT, F., 1987. Stress fields in the European platform at the time of Africa-Eurasia collision. *Tectonics*, 6, p. 99-132.
- BLES, J. L., BONJOLY, D., CASTAING, C. et GROS, Y., 1989. Successive post-Variscan stress fields in the French Massif Central and its borders (Western European plate): comparison with geodynamic data. *Tectonophysics*, 169, p. 79-111.
- BURG, J. P. et ETCHECOPAR, A., 1980. Détermination des systèmes de contraintes liés à la tectonique cassante au cœur du Massif Central français : la région de Brioude (Haut-Allier). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 290, série D, p. 397-400.
- CRADDOCK, J. P., JACKSON, M., VAN de PLUIJM, B. et VERSICAL, R. T., 1993. Regional shortening fabrics in eastern north America: far-field stress transmission from the Appalachian-Ouachita orogenic belt. *Tectonics*, 12, p. 257-264.
- ETCHECOPAR, A., 1984. Étude des états de contraintes en tectonique cassante et simulation des déformations plastiques (approche mathématique). *Thèse Sc.*, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 270 p.
- ETCHECOPAR, A. et MATTAUER, M., 1988. Méthodes dynamiques d'analyse des populations de failles. *Bull. Soc. géol. France*, 8, p. 289-302.
- GAVIGLIO, P., 1985. A fault and stress field analysis in a coal mine (Gardanne, Bouches du Rhône, France). *Tectonophysics*, 113, p. 349-366.
- LACOMBE, O., 1992. Maclage, fracturation et paléo-contraintes intraplaques : application à la plate-forme carbonatée ouest-européenne. *Thèse Sc.*, Université P.-et-M.-Curie. Mém. Sciences de la Terre, n° 92-24, 316 p.
- LACOMBE, O., ANGELIER, J. et LAURENT, P., 1992. Determining paleostress orientations from faults and calcite twins: a case study near the Sainte-Victoire Range (southern France). *Tectonophysics*, 201, p. 141-156.
- LACOMBE, O., BERGUES, J., ANGELIER, J. et LAURENT, P., 1991. Quantification des paléo-contraintes à l'aide des macles de la calcite : l'exemple de la compression pyrénéo-provençale au front de la Montagne Sainte-Victoire (Provence). *C. R. Acad. Sci. Paris*, 313, série II, p. 1187-1194.
- LACOMBE, O. et LAURENT, P., 1991. Variation of deformation style and decreasing magnitude of tectonic stress north of the Pyrenean Orogeny. *Terra Abstracts*, Supp. 5 to Terra Nova vol. 3, *International conference on "Mechanical Instabilities in Rocks and Tectonics"*, Montpellier, p. 21.
- LACOMBE, O. et LAURENT, P., 1992. Determination of principal stress magnitudes using calcite twins and rock mechanics data. *Tectonophysics*, 202, p. 83-93.
- LACOMBE, O., LAURENT, P. et ANGELIER, J., 1994. Calcite twins as a key to paleostresses in sedimentary basins: preliminary results from drill cores of the Paris basin. In *Peri-Tethyan Platforms*, ROURE, F., éd., Technip, p. 197-210.
- LARROQUE, J. M., 1987. Analyse de la déformation de la série salifère du bassin potassique de Mulhouse, et évolution du champ de contraintes dans le sud du fossé rhénan au tertiaire et à l'actuel. *Thèse Sc.*, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 206 p.
- LAURENT, P., 1984. Les macles de la calcite en tectonique : nouvelles méthodes dynamiques et premières applications. *Thèse Sc.*, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 324 p.
- LAURENT, P., TOURNERET, C. et LABORDE, O., 1990. Determining deviatoric stress tensors from calcite twins. Application to monophased synthetic and natural polycrystals. *Tectonics*, 9, 3, p. 379-389.
- LETOUZEY, J., 1986. Cenozoic paleo-stress pattern in the Alpine foreland and structural interpretation in a platform basin. *Tectonophysics*, 132, p. 215-231.
- MATTAUER, M. et MERCIER, J. L., 1980. Microtectonique et grande tectonique. *Mem. Hors Sér. Soc. géol. France*, 10, p. 141-161.
- PARIS, A., DAYRE, M. et VIALON, P., 1975. Calcul des contraintes permettant l'apparition d'un réseau de fissures en dièdre. Cas particulier de calcaires provençaux. *3 RST*, Montpellier, SGF, p. 284.
- PETIT, J. P. et MATTAUER, M., 1995. Paleostress superimposition deduced from mesoscale structures in limestone: the Matelles exposure, Languedoc, France. *J. Struct. Geol.*, 17, 2, p. 245-256.
- SOLOMON, S. C., RICHARDSON, R. M. et BERGMAN, E. A., 1980. Tectonic stress: models and magnitudes. *J. Geophys. Res.*, 85, B11, p. 6086-6092.
- TAPPONNIER, P., PELTZER, G. et ARMIGO, R., 1986. On the mechanics of the collision between India and Asia. *Geol. Soc. Spec. Publ. London*, 19, p. 115-157.
- TOURNERET, C., 1990. Maclage et état de contraintes dans les roches carbonatées du domaine fragile. Application à des plates-formes d'avant-pays de chaînes (Pyrénées, Alpes). *Thèse Sc.*, Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 196 p.
- TOURNERET, C. et LAURENT, P., 1990. Paleostress orientations from calcite twins in the north pyrenean foreland, determined by the Etchecopar inverse method. *Tectonophysics*, 180, p. 287-302.
- ZOBACK, M. L., 1992. First and second-order patterns of stress in the lithosphere: the World Stress Map Project. *J. Geophys. Res.*, 97, B8, p. 11703-11728.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES