

## Quantification des paléocontraintes à l'aide des macles de la calcite : l'exemple de la compression pyrénéo-provençale au front de la Montagne Sainte-Victoire (Provence)

Olivier LACOMBE, Jean BERGUES, Jacques ANGELIER et Philippe LAURENT

**Résumé** – Nous estimons les magnitudes des paléocontraintes associées à la compression pyrénéo-provençale fini-Eocène au front du chevauchement de la Montagne Sainte-Victoire. Cette estimation repose sur les analyses combinées des macles de la calcite (qui fournissent directement les valeurs des contraintes différentielles), de l'enfouissement et des propriétés mécaniques du matériau rocheux déterminées par des essais de compression en laboratoire.

### Palaeostress estimation using calcite twins: application to the Pyrenean compression near the Sainte-Victoire Range (Provence)

**Abstract** – We estimate palaeostress magnitudes associated with the late Eocene Pyrenean compression, near the Sainte-Victoire thrust. These estimates rely upon the combined analyses of calcite twins (which provide directly differential stress magnitudes), palaeodepth of deformation and mechanical properties of the rock mass determined from compressional laboratory experiments.

**Abridged English Version** – I. INTRODUCTION. – The dynamic analysis of mechanical twin sets in calcite yields the orientations of related palaeostresses [1] as well as the differential stress magnitudes ([2], [3]). Following fault slip analyses [4], computer-based methods for inversion of calcite twin data have been improved [5]. These methods provide five independent parameters among the six for the complete stress tensor  $T$ , which describe palaeostress orientations ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , with the compressions positive) as well as differential stress magnitudes ([5], [6]). Four of these parameters define the "reduced stress tensor"  $Tr$ , such as  $T = k Tr + lI$  [ $k$  and  $l$ , scalars ( $k > 0$ ) and  $I$ , unit matrix]. The fifth parameter corresponds to the scale factor of the tensor ( $k$ ) and depends on the existence of a constant yield stress value for twinning [7].

We propose estimates of palaeostress magnitudes near the Sainte-Victoire thrust (Provence), based primarily on combined analyses of calcite twins, palaeodepth of deformation and rock mechanics.

II. LATE EOCENE PYRENEAN COMPRESSION AND ASSOCIATED PALAEOSTRESSES: THE SAINTE-VICTOIRE THRUST. – A detailed analysis of faults and calcite twins has been carried out near the Sainte-Victoire thrust, and successive stress fields since the late Cretaceous have been reconstructed ([8], [9]). The N-S compression corresponds to both reverse ( $\sigma_3$  vertical) and strike-slip fault regimes ( $\sigma_2$  vertical). The stress tensors and the  $\sigma_1$  orientations determined from both indicators are consistent and regionally homogeneous, despite the complexity of the structural setting (Fig. 1 and Tables I and II).

III. DETERMINATION OF PALAEOSTRESS MAGNITUDES USING CALCITE TWINS, PALAEODEPTH ESTIMATION AND ROCK MECHANICS. – 1. *Principle*. – The differential stress value ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) determined from calcite twins ([5], [6]) fixes the scale of the Mohr circle associated with the tensor. The determination of the remaining parameter (*i.e.*, the position of this circle along

Note présentée par Jean AUBOUIN.

the normal stress axis) can be done in two ways ([10], [11]):

– *Evaluation of the lithostatic stress  $\sigma_v$* : the missing parameter (scalar 1) is determined by fixing the value (in dry conditions) of the vertical principal stress, as a function of the palaeodepth at the time of the tectonic event considered.

– *Combining calcite twin analysis with rock mechanics*: if subsets of faults and twins provide similar reduced stress tensors in a given site, they may be thought to have developed “contemporaneously” (in terms of geologic time). As calcite twins record the “peak” stress reached during the entire history of the rock mass [12], the maximum recorded differential stress should correspond to the stress which induced rock failure (because failure releases stress). Consequently, if newly-formed faults developed, fitting the ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$ ) Mohr circle determined from calcite twins with the failure curve yields values of palaeostress that prevailed just before rupture (Fig. 2).

2. *Determination of the failure envelope of the Ypresian limestones*. – The failure envelope of the Ypresian limestones from the Cengle plateau was determined using rock mechanics experiments (Fig. 3). Two samples were submitted to cylindrical triaxial compression under various confining pressures (0, 10 and 30 MPa); we evaluated the magnitude of the deviatoric stress that must be added to each confining pressure to reach rock failure. The resulting envelopes are very consistent (Fig. 3).

IV. RESULTS. – 1. *Reverse fault regime and associated palaeostress magnitudes*. – In the site Pont-de-Bayeux, reverse faults probably developed during the late Lutetian. At that time, the thickness of sedimentary formations above the Dano-Montian limestones [15] was about 450-500 m. This yields a vertical stress  $\sigma_v = \sigma_3$  of about 12 MPa. We consequently obtain:  $\sigma_1 = 55$  MPa;  $\sigma_2 = 23$  MPa.

2. *Strike-slip fault regime and associated palaeostress magnitudes*. – In the site Cengle 2, the best fit of the ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$ ) Mohr circle with the failure envelope (Fig. 2) leads to values:  $\sigma_1 = 89$  MPa;  $\sigma_2 = 16$  MPa;  $\sigma_3 = 3$  MPa.

In the site Cengle 1, Ypresian limestones were overlain at the end of the Lutetian by approximately 170-200 m thick sediments ([15], [16]); this corresponds to a value of  $\sigma_v = \sigma_2$  of about 5-6 MPa. Therefore we calculate:  $\sigma_1 = 40$  MPa;  $\sigma_3 = -6$  MPa.

V. DISCUSSION AND CONCLUSION. – The results in the site Pont-de-Bayeux for the pure compressional regime are consistent with previous stress estimations in the Cengle plateau [16]. For the strike-slip fault regime, the stress values determined in site Cengle 2 are found to be larger than those estimated in site Cengle 1, in agreement with the location of these sites with respect to the thrust front. The corresponding value of the vertical stress  $\sigma_v = \sigma_2 = 16$  MPa suggests a thickness of overlying rocks of about 600 m above the Ypresian limestones, which may indicate a greater southward extent of the Sainte-Victoire thrust at that time. In all cases, these stress values are smaller than those estimated in the southern part of the Arc basin [17], where the palaeodepth was increased by the thick Etoile thrust sheet.

During the late Eocene compression and near the surface (depth < 500 m), the values (in dry conditions) of the tectonic stresses were probably about 40 to 80 MPa for the N-S stress and about 0 to 20 MPa for the E-W stress.

Note however that the variability of  $\sigma_1$  magnitude (40 to 89 MPa) associated with the strike-slip regime may be partly related to methodological uncertainties on the determination of the value of the ratio  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  ([8], [12]). These uncertainties have a large influence on the calculation of  $\sigma_3$  and  $\sigma_1$  values for strike-slip regime, in contrast to

compressional or extensional regimes for which the magnitude of  $\sigma_3$  or  $\sigma_1$  is directly determined from the vertical stress without taking the  $\Phi$  value into account.

I. INTRODUCTION. — L'analyse dynamique du maclage mécanique des cristaux de calcite permet la détermination des paléocontraintes responsables de la déformation cristalline, à la fois en orientations [1] et *pro parte* en magnitudes ([2], [3]). Par analogie avec l'étude des failles à stries [4], des méthodes d'analyse inverse des macles de la calcite ont été mises au point et appliquées à la reconstruction des paléocontraintes [5]. Ces méthodes conduisent à la détermination du tenseur de contrainte déviatorique, incluant cinq des six variables indépendantes du tenseur réel  $T$ . Ces cinq paramètres décrivent les orientations des paléocontraintes principales ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , avec les compressions positives), ainsi que les valeurs des contraintes différentielles ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) et ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) ([5], [6]). Parmi ces paramètres, quatre résultent directement de la géométrie du maclage et définissent le tenseur « réduit »  $Tr$  tel que  $T = k Tr + lI$  ( $k > 0$  et  $l$  sont des scalaires,  $I$  est la matrice unité). Le cinquième paramètre, qui correspond au facteur d'échelle du tenseur ( $k$ ), dépend de l'existence d'un seuil de maclage constant [5]. Ce seuil est indépendant de la température et de la pression de fluides [7], mais il est fonction de la taille du grain [3]. Pour garantir la validité d'une analyse inverse, il faut donc étudier des cristaux de taille homogène. Dans ce qui suit, la valeur du seuil de maclage sera prise égale à 10 MPa, pour des cristaux d'environ 200-400  $\mu\text{m}$  [7]. Nous nous proposons à partir de l'exemple de la Sainte-Victoire de montrer comment on peut quantifier les paléocontraintes en combinant les analyses des macles et des failles avec les données sur l'enfouissement et sur la mécanique des roches.

II. COMPRESSION PYRENEO-PROVENÇALE ET CHAMP DE CONTRAINTE ASSOCIE : LE CHEVAUchement DE LA SAINTE-VICTOIRE. — Une étude tectonique détaillée a été effectuée au front du chevauchement de la Sainte-Victoire. Le polyphasage tectonique a été clairement caractérisé et interprété en termes de paléo-champs de contraintes successifs depuis le Crétacé supérieur [8]. Ces résultats ont été comparés aux données tectoniques sur le Bassin de l'Arc [9].

L'épisode majeur de compression N-S d'âge Eocène supérieur se manifeste clairement aux deux échelles d'observation, macroscopique et microscopique. Le régime est soit purement compressif ( $\sigma_3$  vertical, failles inverses), soit décrochant ( $\sigma_2$  vertical), parfois mixte. Les tenseurs calculés indépendamment à l'aide des failles et des macles sont cohérents et compatibles (*fig. 1*, tableaux I et II). Les orientations de la contrainte compressive maximale  $\sigma_1$  (subhorizontale) s'avèrent régionalement homogènes malgré la complexité de la déformation au front du chaînon (*fig. 1*).

III. QUANTIFICATION DES PALÉOCONTRAINTES A L'AIDE DES MACLES DE LA CALCITE, DE LA PROFONDEUR D'ENFOUISSEMENT ET DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES. — Nous considérons ici les données collectées dans trois sites de calcaires continentaux tertiaires (Cengle 1, Cengle 2 et Pont-de-Bayeux : *fig. 1*) où les contraintes différentielles ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) et ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ) sont fournies par l'analyse des macles, et où les charges lithostatiques peuvent être raisonnablement estimées.

1. *Principe.* — La valeur de la contrainte différentielle ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) déterminée par l'analyse des macles fixe l'échelle du cercle de Mohr associé au tenseur. Le paramètre manquant est la position de ce cercle sur l'axe des contraintes normales, caractérisée par le scalaire  $l$ .

TABLEAU I

Tenseurs déterminés à l'aide des macles de la calcite [5]. Directions et inclinaisons de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  en degrés. Rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . N1 : Nombre de plans maclés mesurés. N2 : Nombre de plans non-maclés mesurés. N3 : Nombre de plans maclés expliqués par le tenseur solution.  $\sigma_i - \sigma_j$  : Valeurs des contraintes différentielles.

*Stress tensors determined from calcite twins [5]. Trend and plunge of stress axes, in degrees.  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ . N1: Number of twinned planes measured. N2: Number of untwinned planes measured. N3: Number of twinned planes compatible with each tensor solution.  $\sigma_i - \sigma_j$ : Differential stress magnitudes.*

TABLEAU II

Tenseurs calculés à l'aide des failles [4]. Même légende ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  et  $\Phi$ ) que pour les macles; N4 : Nombre de failles expliquées par le tenseur solution. ANG : Angle moyen entre strie réelle et strie calculée, en degrés.

*Stress tensors determined from striated faults [4]. Same key for stress axes and  $\Phi$  ratio as for calcite twins. N4: Number of faults consistent with the tensor. ANG: average angle between computed shear stress and observed slickenside lineation, in degrees.*

TABLEAU I

Macles de la calcite									
Sites	$\sigma_1$ (°)	$\sigma_2$ (°)	$\sigma_3$ (°)	$\Phi$	$\sigma_1 - \sigma_3$ (MPa)	$\sigma_2 - \sigma_3$ (MPa)	N1	N2	N3
Cengle1	201-03	106-56	293-33	0.4	46	18.5	144	29	43
Cengle2	350-06	231-77	081-11	0.15	86	13	219	36	87
Pont Bay	358-04	268-06	121-83	0.26	43	11	122	41	36

TABLEAU II

Failles						
Sites	$\sigma_1$ (°)	$\sigma_2$ (°)	$\sigma_3$ (°)	$\Phi$	N4	ANG (°)
Cengle1	001-07	091-01	188-83	0.56	51	9
Cengle2	169-04	354-86	259-00	0.38	16	9
Pont Bay	014-02	284-07	121-82	0.59	40	12
	032-24	177-61	295-15	0.29	7	9
Palette	012-05	281-10	130-79	0.47	21	11

La détermination de  $l$  peut s'effectuer de plusieurs façons [10] :

– *par évaluation de la contrainte lithostatique  $\sigma_v$*  : on détermine  $l$  en fixant la valeur à sec de la contrainte principale verticale ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  ou  $\sigma_3$  selon le type de déformation) en fonction de la paléoprofondeur lors de la déformation. Ainsi, dans le site Pont-de-Bayeux, en l'absence de données sur la rupture et la friction applicables aux failles, seule la détermination de  $\sigma_v$  permet d'accéder aux valeurs des paléocontraintes ([10], [11]).

– *par l'analyse combinée des macles de la calcite et des propriétés mécaniques du matériau* : la similitude des tenseurs réduits reconstitués dans une même station aux deux échelles d'investigation indique qu'il est raisonnable de considérer que les failles et les macles expliquées par ces tenseurs se sont développées de façon « contemporaine », à l'échelle de temps de l'événement tectonique considéré. De plus, la magnitude de la contrainte différentielle maximum ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) enregistrée par les macles (fig. 2) correspond au « pic de contrainte » de l'événement [12]. Ainsi, si le seuil de rupture a été atteint (auquel cas des failles néoformées sont présentes), la contrainte différentielle qui a provoqué cette rupture doit correspondre à la contrainte maximale reconstituée par l'étude des macles, car la rupture relâche immédiatement les contraintes. Dans ces conditions, l'ajustement du cercle de Mohr ( $\sigma_3$ ,  $\sigma_1$ ) obtenu par les macles avec la courbe de rupture intrinsèque de la roche se justifie théoriquement et permet de fixer  $l$  et les valeurs de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  au moment de la rupture (fig. 2).

2. *Détermination de la courbe intrinsèque de rupture des calcaires yprésiens.* – Divers essais de mécanique des roches ont été effectués sur les calcaires yprésiens du Cengle [sites Cengle 1, Cengle 2 et Palette (fig. 3)]. Des éprouvettes de matériau « intact » ont

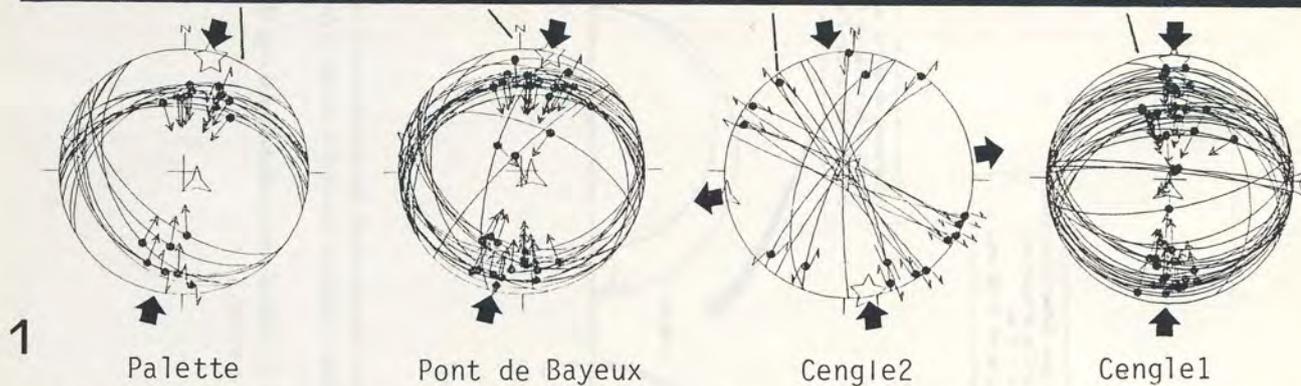
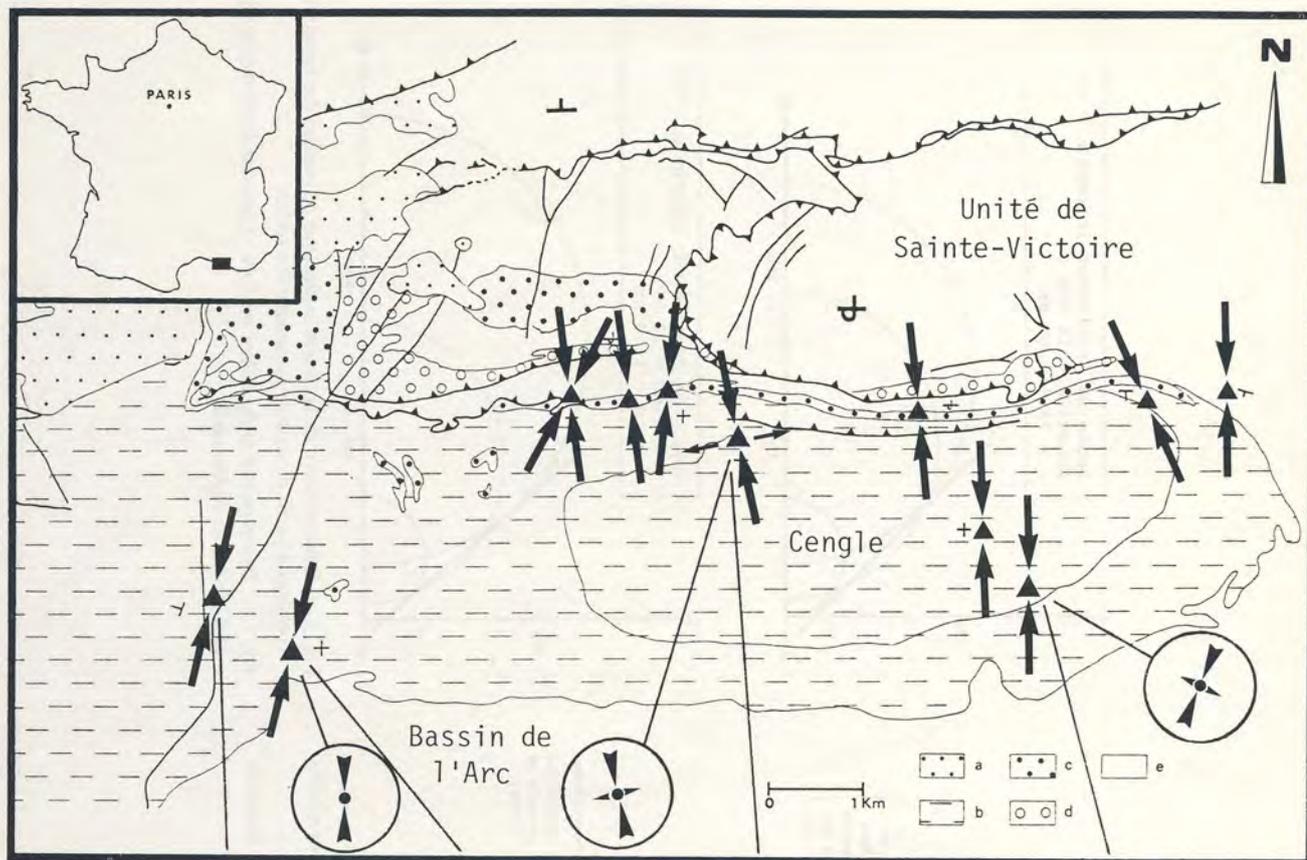


Fig. 1. — Carte structurale schématique de la région d'étude et directions de paléocontraintes reconstituées à l'aide des failles et des macles de la calcite pour la compression N-S fini-Eocène. Contacts stratigraphiques et tectoniques d'après [15]. a, Miocène; b, c, Eocène (c=brèches dano-montiennes); d, e, Mésozoïque (d=brèches du Campanien supérieur). Diagrammes de projection de Schmidt, hémisphère inférieur. Axes des contraintes principales reconstituées à partir des failles [4]; étoiles à 5, 4 et 3 branches : axes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , respectivement). Directions de compression et d'extension indiquées par des flèches noires. Projection horizontale des axes  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  reconstitués à l'aide des macles de la calcite [5] : petits cercles dans le cadre de la carte.

Fig. 1. — Schematic map of the area studied and palaeostress orientations reconstructed using faults and calcite twins for the late Eocene N-S compression. a, Miocene; b, c, Eocene (c=Dano-Montian breccia) ; d, e, Mesozoic (d=late Campanian breccia). Stratigraphic and tectonic contacts after [15]. Lower hemisphere, equal-area projection. Principal stress axes reconstructed from faults [4]. Stars with 5, 4 and 3 branches indicate  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  axes, respectively. Directions of compression and extension shown as black arrows. Horizontal projection of  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  axes determined using calcite twins [5]: small circles in the map frame.

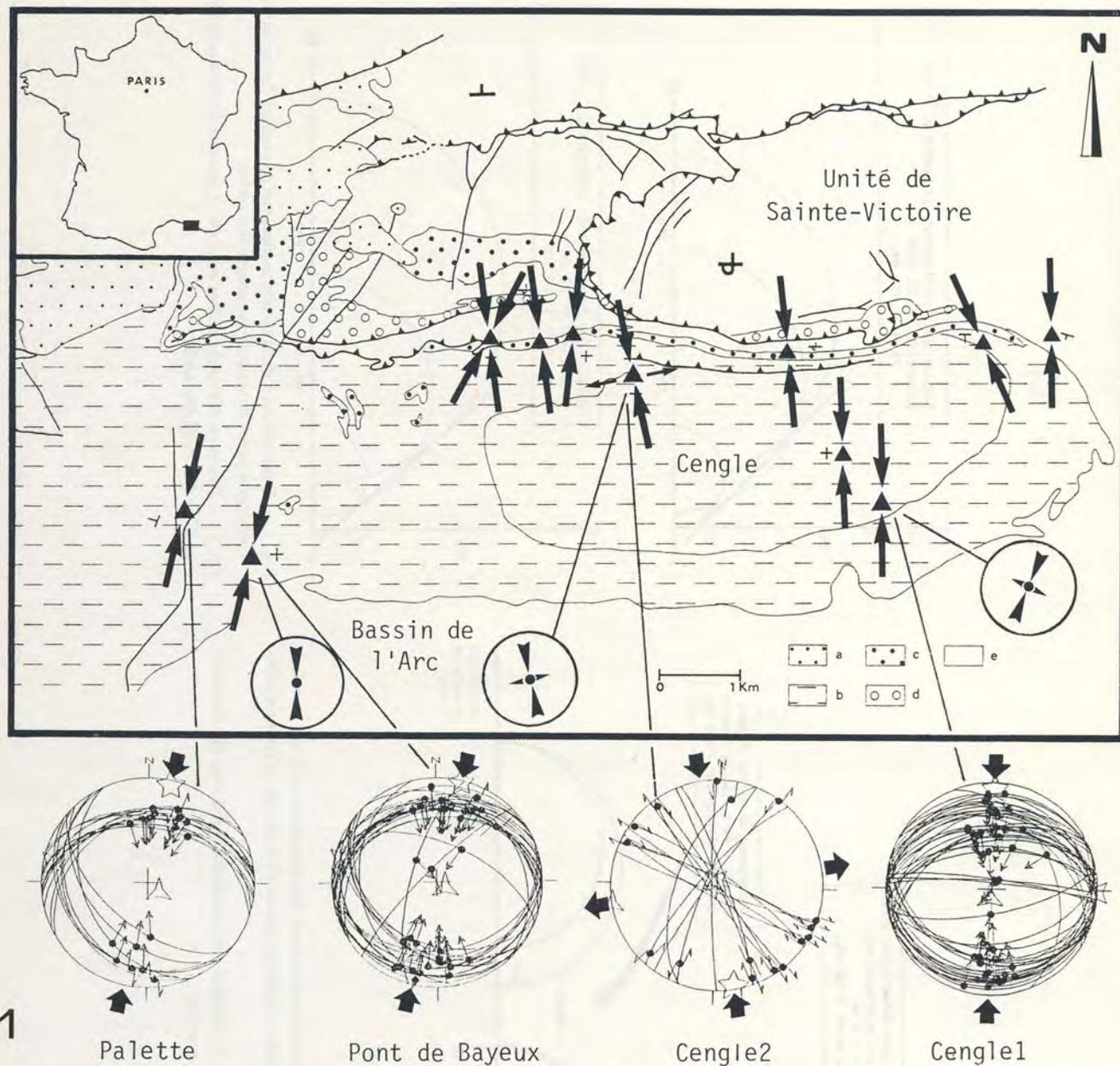


Fig. 1. — Carte structurale schématique de la région d'étude et directions de paléocontraintes reconstituées à l'aide des failles et des macles de la calcite pour la compression N-S fini-Eocène. Contacts stratigraphiques et tectoniques d'après [15]. a, Miocène; b, c, Eocène (c = brèches dano-montiennes); d, e, Mésozoïque (d = brèches du Campanien supérieur). Diagrammes de projection de Schmidt, hémisphère inférieur. Axes des contraintes principales reconstituées à partir des failles [4]; étoiles à 5, 4 et 3 branches : axes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , respectivement). Directions de compression et d'extension indiquées par des flèches noires. Projection horizontale des axes  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  reconstitués à l'aide des macles de la calcite [5] : petits cercles dans le cadre de la carte.

Fig. 1. — Schematic map of the area studied and palaeostress orientations reconstructed using faults and calcite twins for the late Eocene N-S compression. a, Miocene; b, c, Eocene (c = Dano-Montian breccia); d, e, Mesozoic (d = late Campanian breccia). Stratigraphic and tectonic contacts after [15]. Lower hemisphere, equal-area projection. Principal stress axes reconstructed from faults [4]. Stars with 5, 4 and 3 branches indicate  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  axes, respectively. Directions of compression and extension shown as black arrows. Horizontal projection of  $\sigma_1$  and  $\sigma_3$  axes determined using calcite twins [5]: small circles in the map frame.

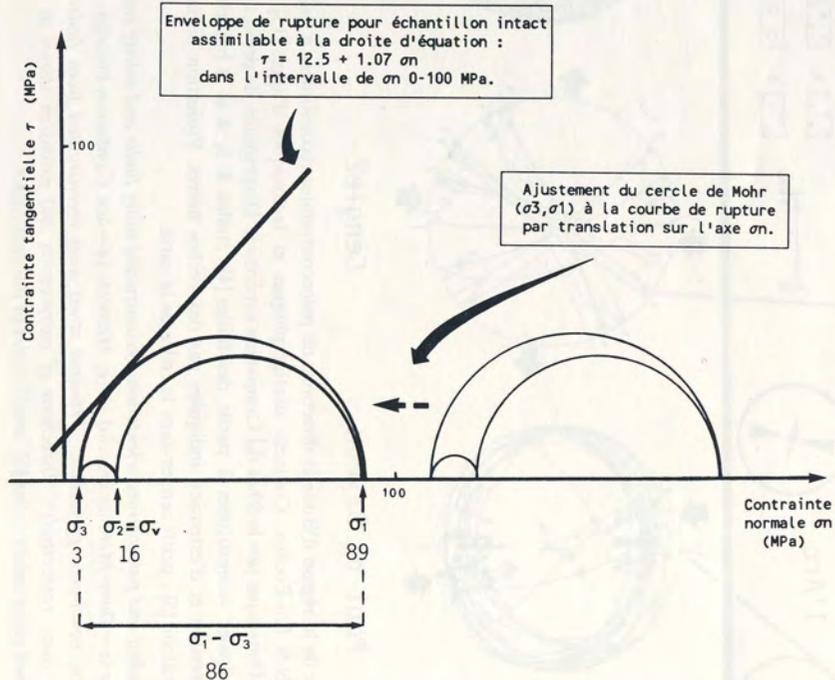


Fig. 2. — Principe de la détermination des grandeurs des contraintes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ , à partir du tenseur déviatorique calculé à l'aide des macles de la calcite, et des propriétés mécaniques du matériau.

Fig. 2. — Principle of determination of principal stress magnitudes knowing the deviatoric stress tensor and rock mechanical properties.

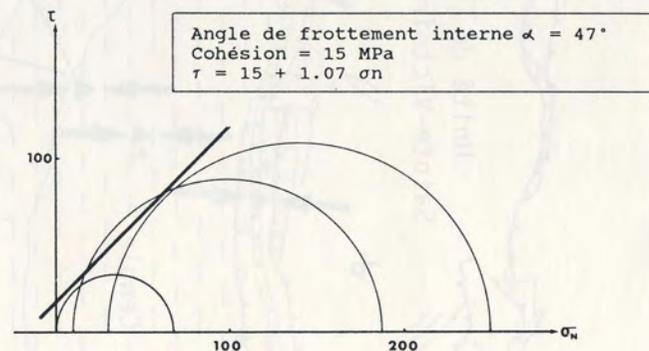
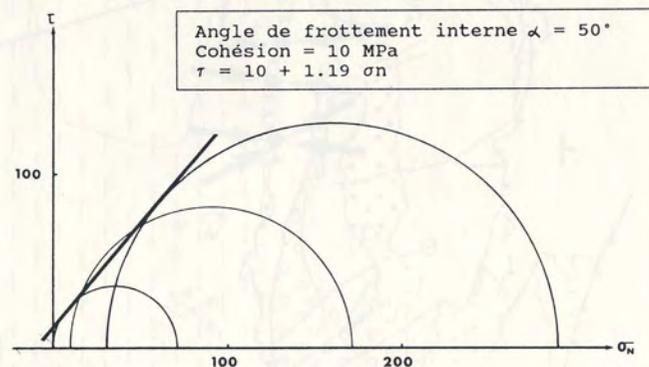


Fig. 3. — Détermination de la courbe intrinsèque de rupture des calcaires yprésiens à partir d'essais de mécanique des roches.

Fig. 3. — Determination of the failure envelope of ypresian limestones using rock mechanics experiments.



été soumises à des essais triaxiaux cylindriques de compression, sous diverses pressions de confinement (0, 10 et 30 MPa). On a alors déterminé la valeur de la contrainte déviatorique superposée à ce confinement qui provoque la rupture. Les deux courbes résultantes sont assimilables à des droites dans l'intervalle de contraintes normales 0-100 MPa et ne diffèrent pas significativement pour les deux échantillons étudiés (*fig. 3*). Dans le cas présent, ni la détermination des courbes « à la fissuration » [13], ni la quantification de la qualité de la masse rocheuse par rapport à celle de l'échantillon intact [14] ne se justifient car à l'époque de la déformation (probablement à la fin du Lutétien), les calcaires yprésiens étaient peu altérés et fissurés, comme en témoigne le caractère essentiellement néoformé de la fracturation dans ces niveaux (*fig. 1*).

IV. RÉSULTATS. — 1. *Paléocontraintes liées au régime en failles inverses.* — Dans le site Pont-de-Bayeux, failles et macles indiquent un régime de contrainte purement compressif (*fig. 1*). Quand les failles inverses se sont développées, probablement à la fin du Lutétien, l'épaisseur des terrains au-dessus des formations dano-montiennes [15] était d'environ 450-500 m. Pour une masse volumique de  $2,65 \text{ g cm}^{-3}$  et  $g=9,81 \text{ ms}^{-2}$ , on calcule une contrainte verticale  $\sigma_v = \sigma_3$  à sec d'environ 12 MPa. Dans ces conditions, on obtient  $\sigma_1 = 55 \text{ MPa}$  et  $\sigma_2 = 23 \text{ MPa}$ .

2. *Paléocontraintes liées au régime en décrochements.* — Dans le site Cengle 2, le régime tectonique indiqué par les failles et les macles est « décrochant » ( $\sigma_2$  vertical) (*fig. 1*). L'ajustement du cercle de Mohr ( $\sigma_3, \sigma_1$ ) à la courbe de rupture (*fig. 2*) conduit aux valeurs  $\sigma_1 = 89 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_2 = 16 \text{ MPa}$  et  $\sigma_3 = 3 \text{ MPa}$ .

Dans le site Cengle 1, la fracturation est constituée pour l'essentiel de failles inverses (*fig. 1*). L'ajustement du cercle de Mohr « calcite » (qui correspond à un régime décrochant) à la courbe de rupture ne se justifie donc plus théoriquement. On peut seulement estimer la contrainte lithostatique qui s'exerçait sur les calcaires yprésiens à la fin du Lutétien. Pour une épaisseur de sédiments d'environ 170-200 m ([15], [16]), on reconstitue ainsi pour le maillage les valeurs  $\sigma_1 = 40 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_v = \sigma_2 = 5 \text{ MPa}$  et  $\sigma_3 = -6 \text{ MPa}$ .

V. DISCUSSION ET CONCLUSION. — Sur le plan régional, les résultats obtenus pour le régime en failles inverses dans le site Pont-de-Bayeux sont très proches des valeurs des contraintes déjà estimées dans le Cengle [16]. Ces valeurs sont cependant moindres que celles déterminées au front de la nappe de l'Étoile [17].

Les valeurs de contraintes calculées pour le régime décrochant diffèrent pour les sites Cengle 1 et Cengle 2. Il est satisfaisant d'observer qu'elles sont plus importantes dans le site Cengle 2, plus proche du front chevauchant (*fig. 1*). Dans ce dernier site où l'enfouissement n'a pas été estimé pour le calcul, la contrainte  $\sigma_2$  de 16 MPa correspond à la contrainte verticale, suggérant un enfouissement des calcaires yprésiens d'environ 600 m à la fin du Lutétien. Cette profondeur importante (par comparaison avec les 170-200 m du Cengle) conduit à envisager une paléo-flèche du chevauchement de la Sainte-Victoire plus importante d'au-moins 400 m que la flèche actuelle. Ces valeurs de contraintes sont bien moindres que celles obtenues sur la bordure Sud du Bassin de l'Arc [17], où l'enfouissement a été considérablement accru par le chevauchement de l'Étoile.

Plus généralement, durant la compression fini-Eocene et au voisinage de la surface (profondeur < 500 m), les valeurs « à sec » des contraintes tectoniques devaient être de l'ordre de 40 à 80 MPa pour la contrainte N-S, et de 0 à 20 MPa pour la contrainte E-W.

Enfin, on doit noter que la variabilité des valeurs de  $\sigma_1$  (40 à 89 MPa) associées au régime décrochant pourrait être en partie liée à l'imprécision méthodologique sur la détermination du rapport  $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$  ([8], [12]). Cette imprécision sur  $\Phi$  affecte davantage le calcul des valeurs de  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  en régime décrochant qu'en régime purement compressif ou extensif, pour lesquels la magnitude de  $\sigma_3$  ou de  $\sigma_1$  est déterminée directement à partir de la valeur de la contrainte verticale, sans faire intervenir la valeur de  $\Phi$ .

Travail financé par l'Institut français du Pétrole, représenté par Jean Letouzey.

Note remise le 10 juin 1991, acceptée le 19 septembre 1991.

#### RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] F. J. TURNER, *Am. J. Sci.*, 251, 1953, p. 276-298.
- [2] M. FRIEDMAN et H. C. HEARD, *A.A.P.G. Bull.*, 58, 1, 1974, p. 71-78; W. R. JAMISON et J. SPANG, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 87, 1976, p. 868-872; C. J. SPIERS et E. H. RUTTER, *In progress in Experimental Petrology*, D25, 1984, p. 241-245.
- [3] T. E. TULLIS, *J. Geophys. Res.*, 85, 1980, p. 6263-6268; K. J. ROWE et E. H. RUTTER, *J. Struct. Geol.*, 12, n° 1, 1990, p. 1-17.
- [4] A. ETCHECOPAR, G. VASSEUR et M. DAIGNIERES, *J. Struct. Geol.*, 3, 1981, p. 51-65; J. ANGELIER, *J. Geophys. Res.*, 89, B7, 1984, p. 5835-5848.
- [5] A. ETCHECOPAR, *Thèse de Doctorat-ès-Sciences*, U.S.T.L., Montpellier, 1984; P. LAURENT, C. TOURNERET et O. LABORDE, *Tectonics* 9, 3, 1990, p. 379-389.
- [6] O. LACOMBE, J. ANGELIER, P. LAURENT, F. BERGERAT et C. TOURNERET, *Tectonophysics*, 182, 1990, p. 279-300.
- [7] F. J. TURNER, D. T. GRIGGS et H. HEARD, *Geol. Soc. Am. Bull.*, 65, 1954, p. 883-934.
- [8] O. LACOMBE, J. ANGELIER et P. LAURENT, *Tectonophysics* (sous presse).
- [9] P. GAVIGLIO et J. F. GONZALES, *Bull. Soc. Géol. France*, III, 4, 1987, p. 675-682.
- [10] P. LAURENT, C. TOURNERET et O. LACOMBE, *13<sup>e</sup> R.S.T.*, 1990, p. 76; O. LACOMBE et P. LAURENT, *Tectonophysics* (sous presse).
- [11] J. ANGELIER, *J. Struct. Geol.*, 11, 1989, p. 37-50.
- [12] C. TOURNERET et P. LAURENT, *Tectonophysics*, 180, 1990, p. 287-302.
- [13] F. BERGERAT, J. BERGUES et J. GEYSSANT, *Geol. Rundschau*, 74, 1985, p. 311-320.
- [14] E. HOEK et E. T. BROWN, *Institution of Mining and Metallurgy*, London, 1980; E. HOEK et J. W. BRAY, *Institution of Mining and Metallurgy*, London, 1981.
- [15] *Carte géol. France 1/50 000, Aix-en-Provence*, B.R.G.M., 1969.
- [16] A. PARIS, M. DAYRE et P. VIALON, *3<sup>e</sup> R.S.T.*, 1975, p. 284.
- [17] P. GAVIGLIO, *Tectonophysics*, 113, 1985, p. 349-366.

O. L. et J. A. : *Tectonique quantitative*, U.R.A. n° 1315, Université P.-et-M.-Curie, Boîte 129,  
4, place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05;

J. B. : *Mécanique des solides*, École Polytechnique, 91128 Palaiseau;

P. L. : *Tectonique et Géochronologie*,  
U.R.A. n° 1371, Université des Sciences et Techniques du Languedoc,  
place E.-Bataillon, 34095 Montpellier Cedex.