

## Contraintes et plissement au front d'une chaîne de collision : l'exemple des calcaires récifaux pliocènes de Yutengping (Taiwan)

par OLIVIER LACOMBE\*, JACQUES ANGELIER\*, MURIEL ROCHER\*, JEAN BERGUES\*\*,  
BENOÎT DEFFONTAINES\*, HAO-TSU CHU\*\*\*, JYR-CHING HU\* et JIAN-CHENG LEE\*\*\*\*

*Mots-clés.* – Taiwan, Orogène, Pli, Anticlinal de rampe, Failles, Macles de la calcite, Paléocontraintes, Mécanique des roches, Rupture, Friction, Quantification des contraintes.

*Résumé.* – A partir de l'exemple du plissement plio-quaternaire dans les piedmonts de Taiwan (région de Chukou), nous caractérisons la nature et la grandeur des paléocontraintes associées au développement d'un anticlinal de rampe. Nous contraignons l'estimation des contraintes avec des essais de mécanique des roches. Nos résultats montrent que les déformations cassantes (décrochements et failles inverses) ont alterné avec la formation du pli. La magnitude des contraintes a décliné au cours de la compression NW-SE, en relation avec l'exhumation des terrains due à l'érosion contemporaine du plissement. Ces résultats ouvrent donc la voie à la compréhension de l'évolution dans le temps et dans l'espace des contraintes tectoniques lors d'un plissement.

### Stress patterns associated with folding at the front of a collision belt : example from the Pliocene reef limestones of Yutengping (Taiwan)

*Key-words.* – Taiwan, Orogen, Fold, Ramp anticline, Faults, Calcite twins, Palaeostresses, Rock mechanics, Failure, Friction, Quantification of palaeostresses.

*Abstract.* – Based on the study of Plio-Quaternary folding in the Taiwan Foothills, we characterize the type and magnitudes of palaeostresses associated with the development of a ramp-anticline. We constrain stress estimates with the results of rock mechanics experiments. Our results show that brittle deformations (reverse and strike-slip faults) alternated with folding. In addition, stress magnitudes have decreased during the NW-SE compression, due to uplift related to syn-folding erosion. Such analyses allow further reconstruction of the evolution in space and time of tectonic stresses during folding.

#### ABRIDGED ENGLISH VERSION

### I. Geological setting and scope of the study

Along the convergent plate boundary between the Philippine Sea plate and Eurasia, active collision occurs in Taiwan [Ho, 1986; Suppe, 1981; Teng, 1990]. The two main geological provinces of Taiwan are the Coastal Range (the accreted Luzon arc) to the east, and the Chinese deformed continental margin (Central Range and Western Foothills) to the west (fig. 1). These units are separated by the Longitudinal Valley fault.

In the Western Foothills, thick series of Neogene detritic sediments are affected by folds and west-verging imbricated thrusts [Suppe, 1980] (fig. 2). These thrusts are associated with major strike-slip faults, which may correspond to transfer faults [Deffontaines *et al.*, 1994]. In the Chukou area, the early-middle Pliocene Kungtien reef limestone (NN14-15 in age) interbedded within the detritic Niaotsui Formation provides good outcrops for analysing brittle tectonics. Numerous fault slip data have been collected in the eastern flank of a N050°E striking fold, the bedding dipping 75°-80° to the SE. Some samples displaying internal deformation by mechanical calcite twinning (fig. 3) and with random crystallographic orientation (fig. 4) were also collected in order to reconstruct palaeostresses from twin analysis.

We aim at determining the type, distribution and evolution of stresses associated with the development of a fold-ramp system, based on the analysis of Plio-Quaternary folding at Yutengping, at the front of the Taiwan collision belt. In addition, we discuss the contribution and limits of such analyses in structural domains characterized by large amounts of deformation.

### II. Methods for palaeostress reconstructions

#### A. Fault slip analysis

The principle of the analysis of fault slip data in terms of palaeostress is well known [e.g., Carey and Brunier, 1974; Angelier, 1975, 1984, 1989; Etchecopar *et al.*, 1981; Etchecopar and Mattauer, 1988]. The basic assumption is that the direction and sense of the observed motion along a fault plane are given by the shear stress exerted on it. The computerized inversion of fault slip data allows calculation of a reduced stress tensor, which is described by the orientations of the three principal stresses  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , compression positive) and the  $\Phi$  ratio [ $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ,  $0 \leq \Phi \leq 1$ ].

\* Lab. Tectonique Quantitative, URA CNRS 1759, Univ. P. et M. Curie, Tour 26-25, 1<sup>er</sup> étage, Boîte 129, 4, place Jussieu, 75252 Paris cedex 05, France.

\*\* Lab. Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau, France.

\*\*\* Central Geological Survey, P.O. Box 968, Taipei, Taiwan (ROC).

\*\*\*\* United Geotech. Inc., 5F, 356 Sec. 5, Nanking East Road, Taipei, Taiwan (ROC).

Manuscrit reçu le 16 juin 1995; accepté après révision le 19 janvier 1996.

### B. Calcite twin analysis

Analysing twinning in calcite grains leads to the orientation and *pro parte* to the magnitude of the principal stresses responsible for twinning [Turner, 1953; Nissen, 1964; Dietrich and Song, 1984; Etchecopar, 1984; Pfiffner and Burckard, 1987; Lacombe and Laurent, 1992]. In this paper, determination of palaeostresses from twin data was performed through numerical inversion [Laurent *et al.*, 1981, 1990; Etchecopar, 1984] which has already led to consistent palaeostress reconstructions [Tournieret and Laurent, 1990; Lacombe *et al.*, 1990, 1993; Rocher, 1994]. The inversion process takes into account both the twinned planes and the untwinned planes, i.e. the potential twin planes oriented so that the resolved shear stress was lower than the yield stress value for twinning  $\tau_a$ . This yield stress value is nearly independent on temperature, confining and fluid pressures, but does depend on grain size [Olsson, 1974; Rowe and Rutter, 1990]. Following several authors [Friedman, 1967; Tullis, 1980; Laurent, 1984; Laurent *et al.*, 1990; Lacombe and Laurent, 1992; Craddock *et al.*, 1993], we have adopted a value of 10 MPa for a grain size of about 300  $\mu\text{m}$ . The process yields a stress tensor that best fits the distribution of measured twinned and untwinned planes: the orientations of  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  are calculated, as well as the  $\Phi$  ratio. Finally, the differential stress magnitudes are determined as follows:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\tau_a}{\tau'_a} \text{ et } (\sigma_2 - \sigma_3) = \phi \times (\sigma_1 - \sigma_3)$$

where  $\tau'_a$  is the smallest resolved shear stress applied on the twinned planes accounted for by the stress tensor.

If many twins are found not consistent with the previous stress tensor, the twinned planes consistent with this tensor are withdrawn, and the process is repeated with the residual twinned planes and the whole set of untwinned planes. Where polyphase tectonism has occurred, this process may allow separation of superposed stress tensors, each of them accounting for part of the data. If uncorrelated, the residuals should be discarded as being noise.

Uncertainties in the parameters of the calculated stress tensors have been evaluated by inversion of numerically generated twin data, twin data collected from experimentally deformed samples, as well as by comparison with fault slip data [Laurent *et al.*, 1990; Tournieret, 1990; Lacombe and Laurent, 1996]. Uncertainties in the orientations of the principal stress axes are lower than  $\pm 10\text{-}15^\circ$ ; the methodological uncertainties in the  $\Phi$  ratio are  $\pm 0,1$ , but natural variations can be much higher (permutation of stress axes) due to heterogeneity and anisotropy of the rock material. Concerning differential stress magnitudes, uncertainties are mainly related to the distribution and percentages of twinned and untwinned planes in the samples, or to questionable separations of superposed stress tensors; such uncertainties may reach  $\pm 30\text{-}50\%$ , which is partially related to uncertainties in the actual value of  $\tau_a$  ( $10 \pm 4$  MPa).

## III. Results : palaeostress orientations associated with Plio-Quaternary folding in the Taiwan foreland

### A. Post-folding compressional stress regimes

In the Yutengping quarry, the reverse faults are consistent with a N120°E compression ( $\sigma_3$  vertical) (fig. 5). Two systems of strike-slip faults could also be identified, related to a N109°E and a N156°E compression (table I). Using calcite twin data, we identified three main compressional trends: N130°E, N110°E and N160°E (fig. 5 and table 2). These  $\sigma_1$  orientations and the observed dispersions are consistent with those deduced from fault slip data.

### B. Pre- to syn-folding compressional stress regimes

The third type of faults observed in the field consists of apparent normal faults, associated with a subvertical  $\sigma_1$  axis, which lies close to the steeply dipping bedding, and a subhorizontal  $\sigma_3$  axis which trends N130°E. Backtilting the strata by rotation along the local strike restores the initial position of faults and stress axes, i.e., a mixed system of reverse and strike-slip faults consistent with a subhorizontal N141°E compression. This compression is nearly perpendicular to fold axis and similar to post-tilt compressions.

As for faults, several tensors deduced from calcite twins correspond to apparent extension ( $\sigma_3$  trending either N040°E-N050°E or N100°E) with  $\sigma_1$  lying within the bedding (fig. 6). Backtilting the bedding as before (fig. 6) leads to a N134°E compression in sample 1 and a N154°E compression in samples 1 and 2.

We thus conclude that these apparent extensional patterns of faults and twins result from passive tilting of earlier compressional features during the development of the cylindrical folds with horizontal axes, and are thus related also to the NW-SE compression.

## IV. Discussion : contribution and limits of microtectonic analysis in large deformation domains

### A. Consistency of results obtained from fault slip and calcite twin analyses

Our study reveals a high level of internal consistency within the sets of tensors reconstituted from calcite twins, and their good agreement with those derived from fault slip analysis (fig. 7). The computed tensors correspond to pre- or post-folding compressional and strike-slip type stress regimes, related to a nearly NW-SE compression.

### B. Contribution of microtectonic analyses in large deformation domains

Faulting and folding which develop during the same compressional event produce apparently complicated fault patterns. The geometrical analysis of interactive folding and faulting provides a key to identify and interpret these patterns and associated apparent changes in stress regimes during folding, the trend of  $\sigma_1$  remaining nearly constant. First, mixed systems of strike-slip and reverse faults developed. Then, folding occurred, inducing tilting of previous faults and producing apparent extensional patterns of faults and twins, which by no means reflect extension. After folding, new strike-slip and reverse faults developed, in addition to compressional reactivation of previous features.

Faults and twins mainly developed before and after folding, and reflect the regional stress field rather than local stress fields due to fold development. The regional significance of the pre- and post-tilt compressions is ascertained by

the analysis of striated faults in surrounding areas in the Foothills [Angelier *et al.*, 1986; Chu, 1990]. The direction of compression remained NW-SE in average, and oscillations between strike-slip and reverse faulting are accounted for by  $\sigma_2/\sigma_3$  permutations.

### C. Limits and uncertainties of this kind of study

The first kind of limit of microtectonic analysis deals with the internal deformation of rock masses, as shown by the high density of twins associated with  $r$  gliding in our samples. This may account for part of the uncorrelated twins, which can be discarded as being noise.

Another type of uncertainties concerns large deformation and structural heterogeneities. The first case was previously illustrated by taking into account block rotation during folding to consistently interpret minor fault patterns. The second aspect concerns the dispersion of post-tilt direction of compression deduced from twins and strike-slip faults; this dispersion can be interpreted as due to block rotations associated with folding or stress deviations near large fault zones.

## V. Quantification of paleostresses associated with folding using calcite twins and rock mechanics data

### A. Determination of differential stresses

The calculated differential stresses related to the NW-SE compression vary between 43 and 71 MPa for post-tilt tensors ( $60 \pm 15$  MPa,  $\pm 15$  MPa corresponding not to the standard error, but to the range of obtained values). These values are higher and more variable for pre/syn-tilt tensors, between 71 and 172 MPa ( $120 \pm 50$  MPa).

The uncertainties in the differential stress magnitudes have been discussed above. We note that the comparison of pre- and post-tilt stress magnitudes, which have been estimated at the same place and from the same material, includes relative uncertainties which are presumably lower than the absolute uncertainties on the stress magnitudes. The difference between pre and post-tilt stresses is consequently significant. In addition, because post-tilt differential stresses are relatively homogeneous (dispersion is only  $\pm 25\%$  around the average value), we consider that the observed variability of pre-folding stresses rather reflects large variations of the depth of overburden (differential stress increasing with depth). These large variations are likely to occur during the development and simultaneous erosion of a ramp anticline. The rapid syn-compressional exhumation of Pliocene limestones due to folding may account for the observed dispersion. Immediately after thrust-anticline development, the thrust propagated towards a more external ramp, which caused a rapid decrease in uplift and erosion of the studied fold-ramp system. As a result, the post-tilt differential stresses within the system considered are lower and more homogeneous. According to this reconstitution, and taking the uncertainties of our results into account, we consider in this paper an average value of 120 MPa for the differential stresses prevailing before (and during) fold development.

### B. Principle of the determination of principal stress magnitudes

The differential stress value ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) determined from calcite twins fixes the scale (i.e., the diameter) of the Mohr circle associated with the tensor. To completely describe the stress regime (orientation and magnitude), the isotropic component of the tensor is missing. The determination of this parameter, which corresponds to the position of the Mohr circle along the normal stress axis in the Mohr diagram, can be done in several ways [e.g., Angelier, 1989; Lacombe and Laurent, 1992]:

— *evaluation of the lithostatic stress*: the isotropic component of the tensor can be determined by fixing the value of the vertical principal stress, as a function of the palaeodepth at the time of the tectonic event considered (fig. 8A). Because the fluid pressure is unknown and cannot be taken into account, this value of the vertical stress should be considered as a maximum value;

— *friction*: fitting the ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) Mohr circle determined from calcite twins with the friction curve [Byerlee, 1978], so that inherited faults are located above the friction line, allows determination of the principal stress values (fig. 8B);

— *failure*: if subsets of newly-formed 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, 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 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) Mohr circle (fig. 8C) determined from calcite twins with the failure curve yields values of principal stresses that prevailed just before rupture.

### C. Determination of intrinsic curves corresponding to rupture and fissuration of the Yutengping limestone

The intrinsic envelopes corresponding to failure and fissuration of the Yutengping limestones were determined using rock mechanics experiments carried out on samples collected in the site investigated. Several samples were submitted to cylindrical triaxial compression under various confining pressures (0, 10 and 25 MPa); we evaluated the magnitude of the deviatoric stress that must be added to each confining pressure to reach macroscopic rock failure (fig. 9A). The resulting envelopes built from the sets of samples are different (fig. 10B), the dispersion resulting from inhomogeneities in corallian limestones. In the following section, we will consider only the fissuration curves which probably better reflect fracture development in natural conditions, including lithological heterogeneities and pre-fracturing.

### D. Attempt to quantify principal palaeostresses associated with folding

Using combined analysis of calcite twins and rock mechanics data, we estimate orders of magnitude of stresses that prevailed during the NW-SE compression. Oscillations between strike-slip and reverse faultings suggest that the magnitudes of  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  were close one to each other, so that their axes can permute. Fitting the ( $\sigma_3, \sigma_1$ ) Mohr circle of diameter 120 MPa and 60 MPa to the average fissuration curve (fig. 10A) leads to values of principal stresses of  $\sigma_1$

~ 150 MPa et  $\sigma_2 \sim \sigma_3 \sim 30$  MPa for pre/syn-folding stresses and  $\sigma_1 \sim 70$  MPa et  $\sigma_2 \sim \sigma_3 \sim 10$  MPa for post-folding stresses, respectively.

The common value of  $\sigma_2$  and  $\sigma_3$  corresponds to the magnitude of the vertical stress  $\sigma_v = \rho gh$  (in dry conditions), which consequently suggests a covering thickness  $h$  of about 1000-1500 m before folding and 300-500 m after folding. These estimates are consistent with stratigraphic data [Ho, 1986] indicating 1500 m of late Pliocene sediments above the studied formation in the area investigated. This leads to a syn-folding erosion of about 700-1000 m during the late Pliocene-early Pleistocene NW-SE compression (fig. 11). Our estimates are also consistent with constraints derived from frictional reactivation of inherited faults [Byerlee, 1978] for the N141°E pre-folding and the N109° post-folding compression, the corresponding faults being located above the initial friction line in the Mohr diagram (fig. 10B and C).

**VI. Conclusion**

We propose a model of alternating faulting (strike-slip / reverse) with folding during the development of a ramp-fold system, associated with a decreasing magnitude of differential stresses in response to syn-folding erosion and subsequent uplift. These results need to be confirmed by further accurate studies.

**I. - CADRE GÉOLOGIQUE ET BUT DE L'ÉTUDE**

L'île de Taiwan (fig. 1A) est le siège d'une collision active entre la plaque de la mer des Philippines et l'Eurasie [Ho, 1986; Suppe, 1981; Teng, 1990]. Les principales provinces tectoniques de Taiwan (fig. 1B et C) comprennent d'une part la Chaîne Centrale et ses piedmonts occidentaux (la marge eurasiatique), d'autre part la Chaîne Côtière orientale (l'arc de Luçon). Ces deux provinces sont séparées par la faille active de la Vallée Longitudinale. Ce contexte géotectonique fait de Taiwan un lieu privilégié pour l'analyse des déformations récentes ainsi que des mécanismes de l'orogénèse.

Les piedmonts occidentaux de l'orogène de Taiwan (fig. 1) sont constitués d'une épaisse série de sédiments néogènes structurée en un empilement d'écaillés et de chevauchements imbriqués à vergence ouest chevauchant la plaine occidentale [Suppe, 1980] (fig. 2); ces chevauchements sont associés à des systèmes de grands décrochements dont certains ont valeur de rampes latérales [Deffontaines *et al.*, 1994]. Ces terrains plissés et faillés correspondent à la couverture sédimentaire déformée de l'ancienne marge eurasiatique. Dans ces séries, quelques masses lenticulaires de calcaires récifaux présentent des conditions d'affleurement favorables à l'analyse tectonique. Le calcaire corallien de Kungtien forme une lentille kilométrique d'âge pliocène inférieur-moyen (NN14-NN15) intercalée dans la formation Niaotsui [Chi, 1980]. La carrière de Yutengping (région de Chukou), où ce calcaire est activement exploité, montre le flanc d'un pli d'axe horizontal orienté N050°E, typique de cette chaîne plissée d'avant-pays. Dans ce flanc, la stratification, en position normale, plonge d'environ 75-80° vers le sud-est.

Les calcaires de cette carrière présentent une fracturation intense. De nombreuses failles à stries (environ 270 décro-

chements, failles inverses et normales) ont pu être mesurées, la taille des plans observés variant du décimètre à l'hectomètre. Par ailleurs, trois échantillons ont été prélevés dans le flanc du pli où ont été mesurées les failles et ont fait

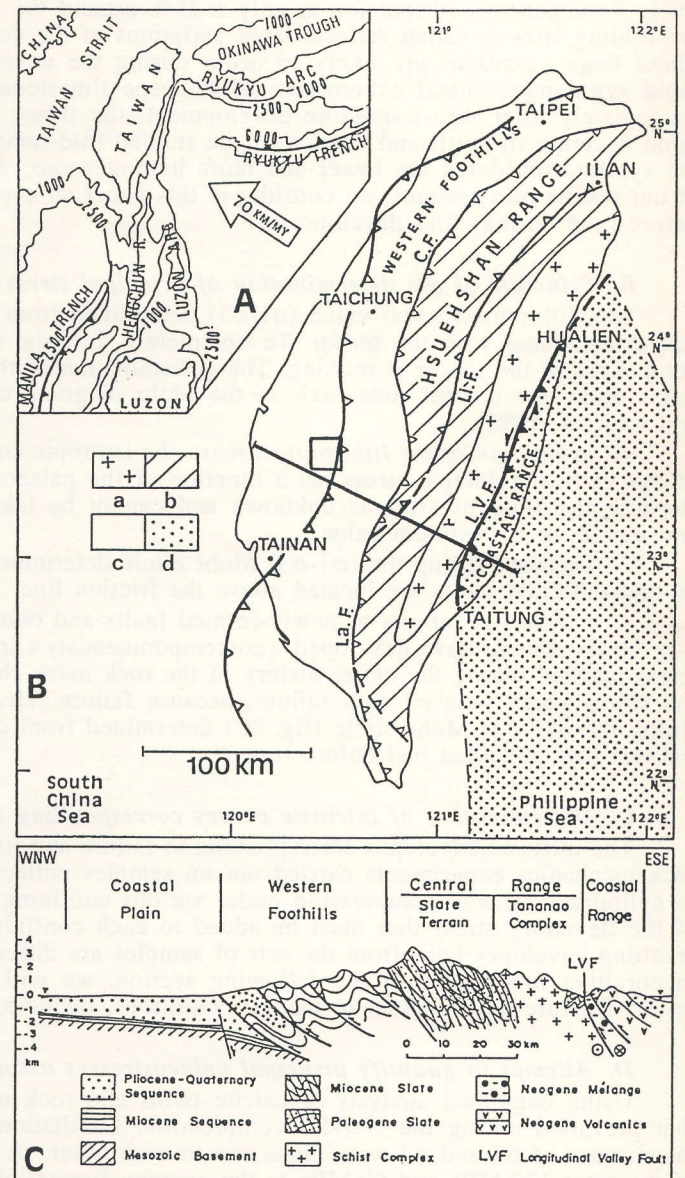


FIG. 1. - A : Geotectonic setting of Taiwan. Large open arrow shows the present direction of convergence of the Philippine Sea plate relative to Eurasia. Isobaths in metres. B : Main structural units of Taiwan : a = pre-Tertiary Central Range (Tananao and Yuli Belts); b = Tertiary Central Range (Slate Belt); c = non-metamorphic foreland fold-and-thrust belt; d = Philippine Sea Plate. The frame indicates the location of the area studied. C : synthetic geologic cross-section of Taiwan [Teng, 1990].

FIG. 1. - A : Geotectonic setting of Taiwan. Large open arrow shows the present direction of convergence of the Philippine Sea plate relative to Eurasia. Isobaths in metres. B : Main structural units of Taiwan : a = pre-Tertiary Central Range (Tananao and Yuli Belts); b = Tertiary Central Range (Slate Belt); c = non-metamorphic foreland fold-and-thrust belt; d = Philippine Sea Plate. The frame indicates the location of the area studied. C : synthetic geologic cross-section of Taiwan [Teng, 1990].

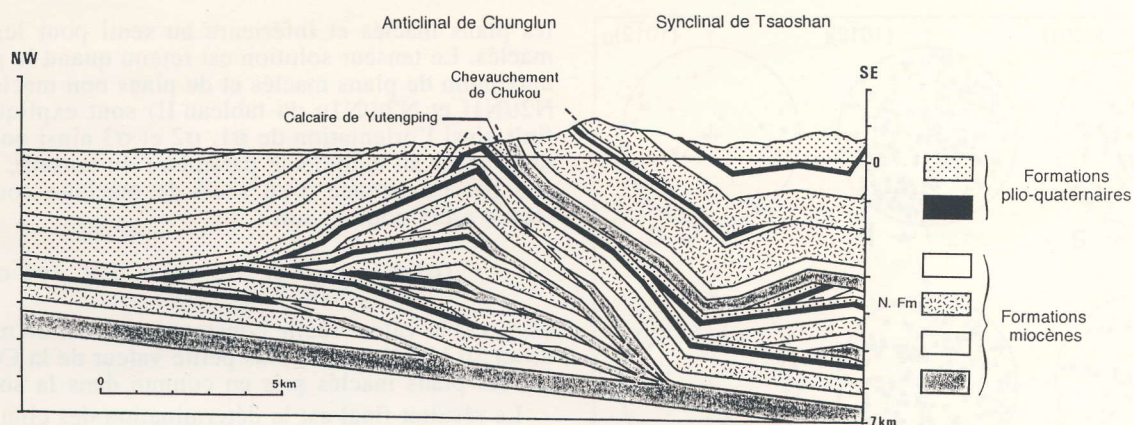


FIG. 2. – Profil géologique à travers l'anticlinal de Chunglun, piedmonts occidentaux. D'après Suppe [1980]. N.Fm : formation Nanchuang (localisation de la coupe, fig.5).

FIG. 2. – Geological cross-section through the Chunglun anticline, western Foothills. After Suppe [1980]. N.Fm : Nanchuang Formation (location of the cross-section, fig.5).



FIG. 3. – Photographies (microscope optique, lumière naturelle) de la déformation par maclage observable dans les calcaires pliocènes de Yutengping. Noter la densité élevée de macles.

FIG. 3. – Photographs (natural light) of twinning within Yutengping Pliocene limestones. Note the high twin density.

l'objet d'une analyse tectonique microscopique. Ces échantillons présentent une déformation caractéristique par maclage (fig. 3). La plupart des cristaux sont maclés sur leurs

trois plans *e* ; en outre, les macles sont quelquefois courbées par du glissement le long des plans de clivage *r*, indiquant que toute la déformation interne de la roche n'a pu être absorbée par le maclage. Cependant, l'absence d'orientations préférentielles des axes optiques des cristaux (fig. 4) a permis l'analyse des macles en termes de paléocontraintes [Rocher, 1994].

Notre étude vise à caractériser, à la fois en orientation et en grandeur, l'état de contraintes associé au développement d'un anticlinal de rampe. Elle complètera en ce sens des travaux plus anciens qui avaient déjà abordé le problème des champs de contraintes et de leur évolution au cours du plissement isopaque [Choukroune et Séguret, 1968 ; Friedman et Stearns, 1971 ; Friedman *et al.*, 1976 ; Allmendinger et Jordan, 1984]. Notre approche multiscale, qui repose sur la combinaison de l'analyse tectonique des failles à stries et des macles de la calcite, permettra en outre de discuter les apports et les limites d'une telle analyse en domaine de grande déformation.

## II. – MÉTHODES DE RECONSTRUCTION DES PALÉO-CONTRAINTES

### A) L'analyse des failles à stries

Le principe de l'analyse en termes de contraintes des populations de failles à stries ne sera pas détaillé ici [voir Angelier, 1975 ; Etchecopar *et al.*, 1981 ; Angelier, 1984, 1989 ; Etchecopar et Mattauer, 1988]. A la suite de Carey et Brunier [1974], les failles à stries ont été interprétées en termes de tenseurs des contraintes, la strie observée sur le plan de faille étant supposée parallèle à la direction de la contrainte tangentielle exercée sur celui-ci, le sens du vecteur contrainte tangentielle donnant le sens du cisaillement [Bott, 1959]. Le tenseur réduit obtenu caractérise l'état de contraintes en fonction duquel les failles ont joué ; il est décrit par quatre paramètres, qui sont les orientations des contraintes principales  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  ( $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ , avec les compressions positives), et la valeur du rapport  $\Phi$  [ $\Phi = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$ ] dont la valeur varie entre 0 et 1. Le détail de l'inversion, la procédure de séparation des tenseurs superposés en cas de polyphasage et les limitations de la méthode sont développés par ailleurs [Angelier, 1984].

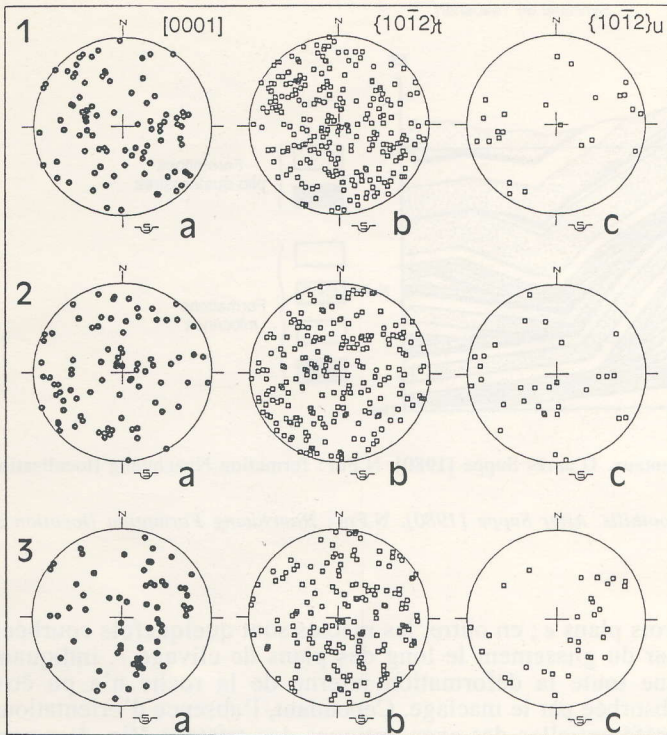


FIG. 4. – Projection stéréographique (Schmidt, hémisphère inférieure) des axes optiques (a) et des pôles des plans maclés (b) et non maclés (c) des cristaux mesurés dans les échantillons de Yutengping, après restitution des données dans le repère géographique.

FIG. 4. – Stereographic projection (lower hemisphere, equal area) of the optic axes (a), and of the poles of twinned planes (b) and untwinned planes (c) with the crystals measured in the samples from Yutengping, after restitution of the data into the geographical coordinate frame.

## B) L'analyse des macles de la calcite

L'analyse du maclage mécanique des cristaux de calcite permet la reconstitution des paléocontraintes, en orientation et *pro parte* en magnitudes [Turner, 1953; Nissen, 1964; Friedman et Heard, 1974; Jamison et Spang, 1976; Dietrich et Song, 1984; Pfiffner et Burckart, 1987; Rowe et Rutter, 1990]. Par analogie avec l'étude des failles à stries, des méthodes d'inversion des données de macles ont été mises au point [Etchecopar, 1984; Laurent, 1984; Laurent *et al.*, 1981, 1990]. Ces méthodes, utilisées avec succès pour comprendre et reconstituer l'évolution tectonique de différentes régions [Lacombe *et al.*, 1990, 1993; Tournier et Laurent, 1990; Rocher, 1994], n'avaient cependant pas été employées à la fois sur des échantillons récents et en domaine de grande déformation.

Le processus d'inversion [Etchecopar, 1984] prend en compte à la fois les plans maclés et les plans non maclés, c'est-à-dire les plans de macle potentiels sur lesquels la contrainte cisailante résolue (CCR) a été trop faible pour atteindre le seuil de maclage. Ce seuil, à peu près indépendant de la température, de la pression de fluides et de la pression de confinement [Turner *et al.*, 1954; Turner et Heard, 1965; Tullis, 1980; Wenk *et al.*, 1983], est fonction de la taille du grain [Olsson, 1974; Rowe et Rutter, 1990]. La valeur de 10 MPa (qui correspond à des cristaux d'environ 300  $\mu\text{m}$  de diamètre) a été adoptée par différents auteurs [Friedman, 1967; Tullis, 1980; Laurent, 1984; Craddock *et al.*, 1993]. Le principe de l'inversion est de déterminer le tenseur qui rend compte du maclage observé, c'est-à-dire qui exerce une CCR supérieure au seuil pour

les plans maclés et inférieure au seuil pour les plans non maclés. Le tenseur solution est retenu quand le pourcentage maximum de plans maclés et de plans non maclés (rapports  $N_{2t}/N_{1t}$  et  $N_{2u}/N_{1u}$  du tableau II) sont expliqués : on définit ainsi l'orientation de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  ainsi que le rapport  $\Phi$ . L'accès au cinquième paramètre du tenseur, qui est permis par l'existence d'un seuil de maclage constant, s'effectue alors comme suit :

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\tau_a}{\tau_a'} \text{ et } (\sigma_2 - \sigma_3) = \phi \times (\sigma_1 - \sigma_3)$$

où  $\tau_a$  est la valeur réelle constante du seuil de maclage (environ 10 MPa) et  $\tau_a'$  la plus petite valeur de la CCR obtenue sur les plans maclés pris en compte dans la solution.

Le résultat final est la détermination des cinq paramètres qui caractérisent le tenseur déviatorique responsable du maclage : les orientations des contraintes principales et les valeurs des contraintes différentielles,  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  et  $(\sigma_2 - \sigma_3)$ .

Quand le premier tenseur est déterminé, les plans maclés compatibles sont retirés du lot, et la procédure est répétée sur les plans maclés restants, ainsi que sur la totalité des plans non maclés. Si l'échantillon a été l'objet d'une déformation polyphasée, cette procédure permet de séparer des tenseurs superposés, chacun rendant compte d'une partie des macles. Comme pour les failles, les quelques données qui ne peuvent être corrélées en termes de tenseurs sont considérées comme du « bruit de fond » et rejetées.

Les limitations de cette méthode et les incertitudes sur les tenseurs calculés ont déjà été discutées sur la base de l'analyse d'échantillons synthétiques (données engendrées numériquement par ordinateur), d'échantillons naturels et d'échantillons déformés expérimentalement [Laurent *et al.*, 1990; Tournier, 1990; Lacombe et Laurent, 1996]. L'analyse combinée des failles à stries et des macles de la calcite et celle d'échantillons déformés en compression uniaxiale montrent que les incertitudes sur la détermination des orientations de  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  n'excèdent pas  $\pm 10-15^\circ$ . Ces valeurs sont similaires à celles déterminées quand on explore la stabilité de la solution obtenue en y incorporant 5% de plans maclés en plus ou en moins.

La valeur de  $\Phi$  est également peu sensible au pourcentage de macles prises en compte dans la solution : la variation est de  $\pm 0,1$  pour une variation du nombre de données de  $\pm 5\%$ , mais peut croître si on incorpore des plans non maclés. Par contre, la valeur de  $\Phi$  peut varier d'un échantillon à l'autre et différer de la valeur obtenue avec les failles. La différence d'échelle entre failles et macles, l'anisotropie et l'hétérogénéité des matériaux et le caractère non instantané de la déformation expliquent cette variabilité de  $\Phi$ . Ainsi, à l'échelle du site, les incertitudes sur  $\Phi$  peuvent atteindre  $\pm 0,3$ , voire aller jusqu'à la permutation des axes de contraintes. Cette imprécision sur  $\Phi$  affecte davantage la détermination des magnitudes de  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  en régime décrochant qu'en régime compressif ou extensif (pour ces derniers, ces magnitudes peuvent être déterminées directement à partir de la grandeur de la contrainte verticale sans faire intervenir la valeur de  $\Phi$ ).

En ce qui concerne les incertitudes sur la magnitude de  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ , elles sont essentiellement liées (1) au pourcentage de plans maclés pris en compte dans la solution et au pourcentage et à la dispersion des plans non maclés, (2) à la difficulté de séparer des tenseurs homoaxiaux superposés et (3) à l'incertitude concernant la valeur réelle du seuil de maclage. La variation de  $\pm 5\%$  du nombre de données prises en compte peut conduire à une incertitude théorique sur  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  de  $\pm 30-50\%$ . Les études sur échantillons déformés expérimentalement conduisent généralement à des incertitudes sur  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  d'environ  $\pm 30-40\%$ , *pro parte* liées à l'incertitude sur la valeur réelle du seuil de maclage ( $10 \pm 4$  MPa).

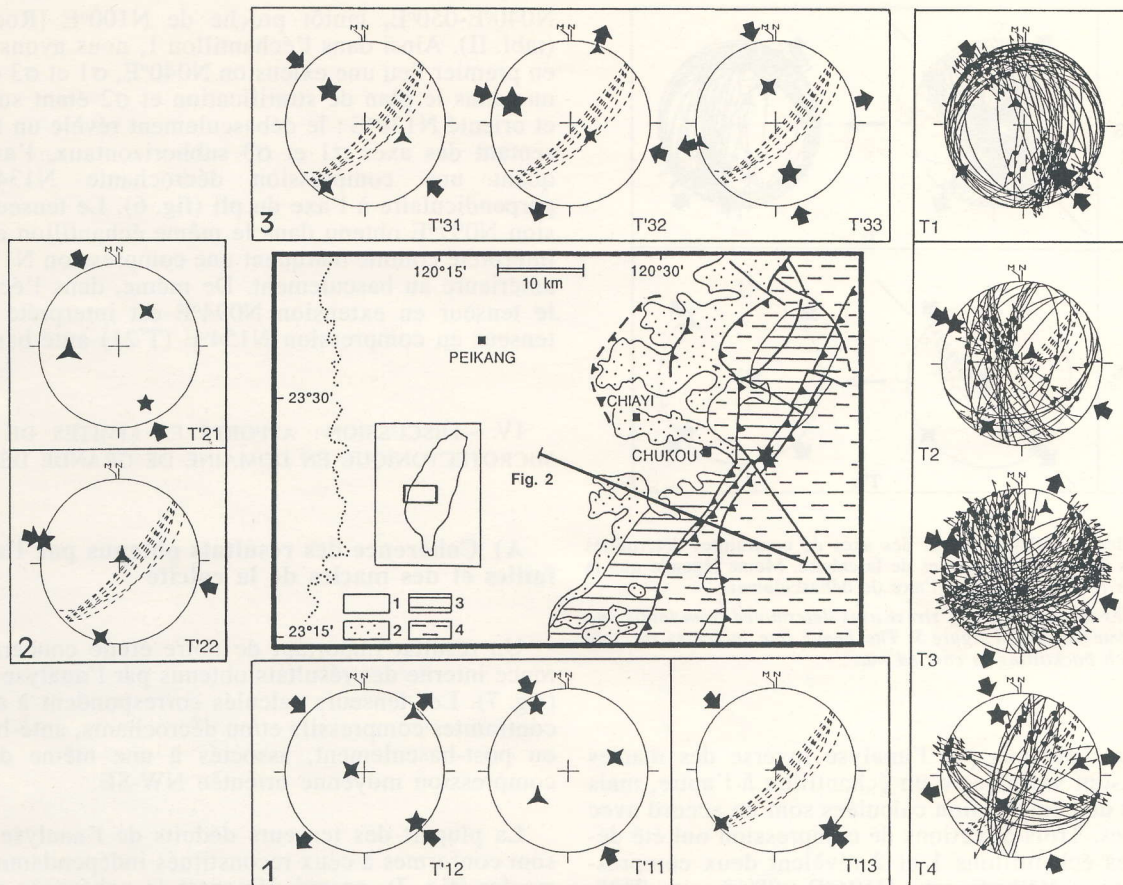


FIG. 5. – Résultats de la reconstruction des paléocontraintes à l'aide des failles à stries et des macles de la calcite dans le site de Yutengping. Macles de la calcite (1, 2 et 3 désignent les numéros des échantillons) : diagrammes (Schmidt, hémisphère inférieur) montrant les axes de contraintes dans leur position actuelle (stratification en tiretés) pour les tenseurs post-basculement, ou après débasculement de la stratification pour les tenseurs anté-basculement. Failles : traces cyclographiques et points avec des doubles flèches : plans de failles et stries correspondantes. Etoiles à 5, 4 et 3 branches : axes  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$ . Flèches noires : directions de compression et d'extension correspondantes. 1 : Holocène ; 2 : Pléistocène ; 3 : Pliocène ; 4 : Miocène. L'étoile désigne le site analysé. Le tenseur T'23 qui reflète probablement un phénomène d'extrados n'a pas été représenté.

FIG. 5. – Results of palaeostress reconstruction based on fault slip and calcite twin analysis in the site of Yutengping. Calcite twins (1, 2 and 3 referring to the number of samples) : diagrams (lower hemisphere, equal area) showing the axes of the stress tensor (a) in their present attitude (bedding shown as dashed lines) for post-tilt tensors, and after backtilting of the bedding for pre-tilt tensors. Faults : thin curves and dots with double arrows : fault planes and corresponding slickenside lineations. Stress axes shown as stars with 5 ( $\sigma_1$ ), 4 ( $\sigma_2$ ) and 3 ( $\sigma_3$ ) branches. Corresponding directions of compression and extension indicated by black arrows. 1. Holocene ; 2. Pleistocene ; 3. Pliocene ; 4. Miocene. The star indicates the location of the site. The tensor T'23 which probably corresponds to extrados, has not been represented.

### III. – RÉSULTATS : ORIENTATION DES PALÉOCONTRAINTES PRINCIPALES ASSOCIÉES AU PLISSEMENT PLIO-QUATÉRNAIRE DANS L'AVANT-PAYS TAIWANAIS

Dans cette partie, nous présentons tout d'abord les systèmes de failles et les tenseurs postérieurs au basculement des couches, dont les axes de contraintes sont dans leur position actuelle et qui sont donc identifiables sans ambiguïté. Seront détaillés ensuite les systèmes de failles et les tenseurs antérieurs au plissement, dont l'identification et l'interprétation nécessitent un raisonnement géométrique préalable.

#### A) Les états de contraintes compressifs postérieurs au plissement

Dans la carrière de Yutengping, les failles inverses qui recoupent obliquement les couches redressées du flanc du pli présentent une large dispersion de leurs orientations (fig. 5). Le calcul d'un tenseur de contraintes indique que

toutes ces failles sont néanmoins compatibles avec une compression orientée N120°E, avec  $\sigma_3$  vertical (T2).

Les décrochements observés présentent également une dispersion importante (fig. 5). Ils se répartissent en deux systèmes cohérents mécaniquement : d'une part, des décrochements senestres N130°E à N190°E et dextres N045°E à N090°E, compatibles avec une compression N109°E (fig. 5 : T3), et d'autre part des décrochements senestres N010°E à N050°E et dextres N100°E à N120°E, compatibles avec une compression N158°E (T4).

Les tenseurs calculés à partir des failles à stries présentent donc des axes  $\sigma_1$  horizontaux ou faiblement pentés, et des axes  $\sigma_2$  tantôt (sub)verticaux, tantôt (sub)horizontaux, correspondant à des populations où dominent les décrochements et les failles inverses, respectivement. Quelques critères de chronologie relative (superpositions de stries, recoupements de structures) suggèrent que les décrochements sont antérieurs aux failles inverses, mais nos observations sont trop peu nombreuses pour établir une chronologie indubitable.

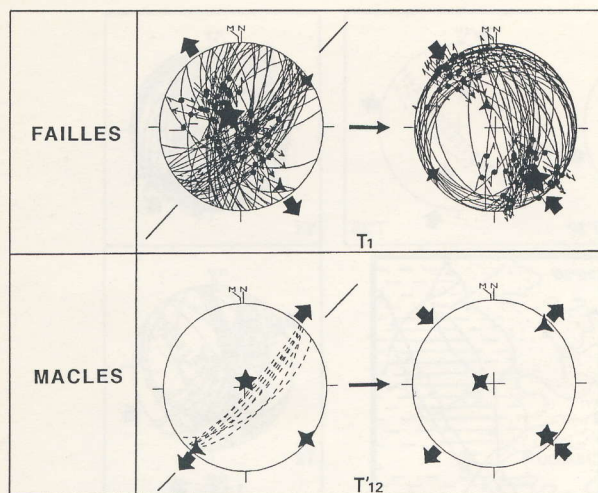


FIG. 6. – Exemples de débasculement des axes de contraintes déterminés par l'analyse des failles et des macles de la calcite. Même légende que la figure 5. Le trait renforcé souligne l'axe de débasculement.

FIG. 6. – Examples of backtilting of stress axes determined from faults and calcite twins. Same key as in figure 5. The heavy line indicates the fold axis around which backtilting is carried out.

Les résultats obtenus par l'analyse inverse des macles de la calcite sont variables d'un échantillon à l'autre, mais les directions de compression calculées sont en accord avec les précédentes. Trois directions de compression ont été déterminées : les échantillons 1 et 2 révèlent deux compressions orientées N136°E et N106°E (T'13 et T'22, respectivement), avec des axes  $\sigma_3$  verticaux. Pour l'échantillon 3, ont été identifiés une compression N132°E (T'31), une compression décrochante N108°E (T'32) et une compression décrochante N164°E moins nette (T'33) (tabl. II). Pour l'ensemble des échantillons, les directions de  $\sigma_1$  sont comparables à celles reconstituées par l'analyse des failles (fig. 5). La dispersion observée ne résulte donc pas d'un artefact lié au traitement des données et à la séparation des tenseurs.

### B) Les états de contraintes compressifs antérieurs (ou synchrones) du plissement

Le troisième type de failles mesurées sur le terrain diffère grandement des précédents. Il s'agit de failles actuellement normales, pour lesquelles le calcul d'un tenseur révèle une direction d'extension apparente N140°E (fig. 6). L'axe  $\sigma_1$  est subvertical et proche du plan de stratification ; l'axe  $\sigma_2$  est horizontal et contenu dans ce plan. Le pli observé étant cylindrique et à axe horizontal, la remise à l'horizontale des couches par rotation autour de l'axe du pli restitue les données de failles et les axes du tenseur correspondant dans leur position avant basculement des couches. Ce « débasculement » conduit à un système de failles inverses peu pentées et de décrochements compatibles avec une compression N141°E (fig. 6 : T1). Nous concluons que ces failles normales résultent du basculement lors du plissement d'un système de failles inverses et de décrochements engendrés auparavant lors d'une compression N141°E. Cette direction est à peu près perpendiculaire à l'axe du pli et en total accord avec les directions de compression reconstituées précédemment.

Comme pour les failles, certains tenseurs obtenus par l'analyse des macles correspondent à des extensions apparentes ( $\sigma_1$  subvertical), l'axe  $\sigma_3$  étant orienté tantôt

N040°E-050°E, tantôt proche de N100°E [Rocher, 1994] (tabl. II). Ainsi dans l'échantillon 1, nous avons caractérisé en premier lieu une extension N040°E,  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  étant contenus dans le plan de stratification et  $\sigma_2$  étant subhorizontal et orienté N130°E : le débasculement révèle un tenseur présentant des axes  $\sigma_1$  et  $\sigma_3$  subhorizontaux, l'axe  $\sigma_1$  indiquant une compression décrochante N134°E (T'12) perpendiculaire à l'axe du pli (fig. 6). Le tenseur en extension N097°E obtenu dans le même échantillon est lui aussi interprété comme marquant une compression N153°E (T'11) antérieure au basculement. De même, dans l'échantillon 2, le tenseur en extension N094°E est interprété comme un tenseur en compression N154°E (T'21) anté-basculé.

## IV. – DISCUSSION : APPORTS ET LIMITES DE L'ANALYSE MICROTTECTONIQUE EN DOMAINE DE GRANDE DÉFORMATION

### A) Cohérence des résultats obtenus par l'analyse des failles et des macles de la calcite

Un résultat important de notre étude concerne la cohérence interne des résultats obtenus par l'analyse des macles (fig. 7). Les tenseurs calculés correspondent à des états de contraintes compressifs et/ou décrochants, anté-basculé ou post-basculé, associés à une même direction de compression moyenne orientée NW-SE.

La plupart des tenseurs déduits de l'analyse des failles sont conformes à ceux reconstitués indépendamment par les macles (fig. 7), ce qui démontre la cohérence des orientations de contraintes à différentes échelles (macroscopique et microscopique).

Dans ce contexte d'importante déformation, les macles n'apportent pas de précision significative par rapport aux failles sur les orientations des paléocontraintes, contrairement à des secteurs peu déformés où la sensibilité du maclage à la contrainte (faible valeur du seuil de maclage) permettait l'enregistrement de contraintes n'ayant pas engendré de fracturation. En fait, dans cet exemple, la similitude des directions de contraintes obtenues par les failles et les macles permet de s'assurer de l'appartenance des tenseurs obtenus par les deux méthodes à la même phase tectonique et de les dater relativement par rapport au plissement.

On peut noter que les failles se sont généralement développées avant ou après le plissement, rarement pendant celui-ci. L'identification de tenseurs anté et post-basculé montre qu'il en est généralement de même pour les macles, c'est-à-dire qu'elles ne résultent pas d'une déformation progressive pendant le plissement. Les macles reflètent donc le champ de contraintes régional à l'origine du plissement, plutôt que des états de contraintes locaux liés au pli lui-même. Cette représentativité régionale des directions de compressions anté et post-basculé est attestée par leur similitude avec les directions obtenues à l'aide des failles à stries (N130°E en moyenne) dans de nombreux autres sites des Foothills pour l'épisode d'âge pliocène terminal – pléistocène [Angelier *et al.*, 1986 ; Chu, 1990]. Compte tenu des incertitudes déjà discutées, la dispersion des directions (N106°E à N160°E) et des inclinaisons (pour les tenseurs post-basculé, 0 à 39° pour les macles, 4° à 23° pour les failles) de  $\sigma_1$  est probablement due à des réorientations locales de contraintes ou des rotations de blocs associées au plissement.



	ANTE-BASCULEMENT		POST-BASCULEMENT	
	Compressif	Décrochant	Compressif	Décrochant
Macles Ech.1	T'11	T'12	T'13	
Macles Ech.2		T'21	T'22	
Macles Ech.3			T'31	T'32 T'33
Faillles	T1		T2	T3 T4

FIG. 7. - Directions des axes  $\sigma_1$  déduites de l'analyse des macles et des failles. La taille des flèches décroît en fonction de la qualité décroissante des tenseurs (tableaux I et II). Le tenseur T'23 qui reflète probablement un phénomène d'extrados n'a pas été représenté.

FIG. 7. - Orientations of  $\sigma_1$  axes deduced from fault and calcite twins. The size of arrows decreases as a function of the decreasing quality of the tensors (tables I and II). The tensor T'23 which probably corresponds to extrados, has not been represented.

### B) Apports de l'analyse microtectonique en domaine de grande déformation

Le dispositif structural observé dans la carrière de Yutengping apparaît complexe. Le plissement a engendré des mouvements des blocs rocheux, ce qui a conduit à des systèmes de failles mineures et de macles *a priori* mécaniquement incompatibles. A cet effet de la déformation finie se surimpose la coexistence d'états de contraintes compressifs et décrochants, associés à une même direction de compression.

Le raisonnement en termes de contraintes est associé ici à des considérations géométriques concernant la disposition des axes de contraintes par rapport aux strates : la complexité apparente des états de contraintes est essentiellement liée à l'interaction plissement-fracturation. Avant plissement, des failles inverses et des décrochements ont joué ; puis l'anticlinal de rampe s'est formé, basculant d'environ  $80^\circ$  ces structures, d'où des failles en apparence normales associées à un axe  $\sigma_1$  proche de la verticale et du plan de stratification, qui sont en fait des failles inverses et des décrochements précoces. Après formation du pli, de nouveaux systèmes de failles inverses et de décrochements se sont développés, comprenant à la fois des failles néoformées, mais également des failles provenant de la réactivation des failles précoces basculées en failles normales. Ces réactivations s'expriment par des superpositions de stries sur les plans de failles et confirment la chronologie établie par rapport au basculement des strates.

Par conséquent, l'identification d'états de contraintes antérieurs (c'est-à-dire dont les axes sont basculés dans le pli) et postérieurs au plissement permet d'interpréter la complexité structurale, l'axe  $\sigma_1$  restant toujours à peu près NW-SE. Par ailleurs, des variations à la fois locales et temporelles de la position des axes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  (permutations) rendent compte des oscillations entre les régimes décrochants et compressifs, ces deux modes de déformation ayant alterné avec la déformation plicative lors de la formation du système rampe-pli. Ainsi, la compression N130°E suffit

à rendre compte de la quasi-totalité des structures observées à toutes les échelles, pli, failles et macles.

Plus généralement, il apparaît que la direction de compression moyenne reste toujours à peu près perpendiculaire à l'axe du pli, ce qui indique qu'il n'existe pas de composante de raccourcissement oblique à celui-ci : cette absence de compression oblique est un cas fréquent dans les Foothills de Taiwan [Angelier *et al.*, 1986].

### C) Limites et incertitudes de ce type d'analyse

La densité de fracturation comme la densité de macles soulignent l'importance de la déformation interne subie par la roche. La figure 3 montre en effet que les calcaires pliocènes étudiés présentent une densité de maillage élevée, avec quelquefois des indices de glissement  $r$ . Cette caractéristique associée à l'hétérogénéité lithologique des faciès coralliens peut constituer une limite à l'application de la méthode, et expliquer la mauvaise corrélation de quelques macles avec les tenseurs présentés.

Une autre source d'incertitude sur les résultats microtectoniques concerne la grande déformation et les hétérogénéités structurales. Les méthodes de reconstruction des paléocontraintes, appliquées initialement en domaines peu déformés de plates-formes, le sont maintenant en domaines déformés [par exemple, Barrier, 1985; Angelier *et al.*, 1986; Hippolyte, 1992]. Ceci nécessite de prendre en compte les éventuels mouvements de blocs lors des plissements ou des perturbations de contraintes à proximité des grands accidents.

Le premier point vient d'être illustré par l'interprétation des failles normales en termes de basculement de structures compressives précoces. Cependant, l'existence d'une extension vraie NW-SE syn à post-basculement ne peut être totalement exclue : elle est d'ailleurs soupçonnée dans l'échantillon 1 comme dans l'échantillon 2 (tenseur T'23) ; il s'agirait alors d'une extension d'extrados. Cet aspect n'est pas l'objet de notre étude et ne sera pas discuté par la suite.

Le second aspect est illustré par l'existence, à côté des tenseurs en compression N130°E, de compressions décrochantes post-plissement N100-110°E et N150-160°E (fig. 7). Cette dispersion d'environ  $20-30^\circ$  de part et d'autre de la compression moyenne peut être expliquée par des rotations de blocs et déviations de contraintes associées au plissement, mais également par des perturbations de contraintes liées aux grands accidents. En effet, la déformation mineure reflète généralement le style régional : comme l'abondance des failles inverses associées au plissement reflète la tectonique régionale en anticlinaux de rampes et chevauchements imbriqués, l'abondance de décrochements mineurs témoigne de la proximité de grands décrochements dont certains ont valeur régionale de failles de transfert ou de rampes latérales [Deffontaines *et al.*, 1994]. Ces décrochements ont pu engendrer d'importantes réorientations de contraintes dans le plan horizontal, comme l'ont suggéré des observations de terrain effectuées ailleurs [e.g., Petit et Mattauer, 1995] et les modélisations numériques [e.g., Xiaohan, 1983; Homberg *et al.*, 1995]. Il convient donc de ne pas invoquer systématiquement des phases tectoniques superposées.

## V. – QUANTIFICATION DES PALÉOCONTRAINTES LIÉES AU PLISSEMENT À L'AIDE DES MACLES DE LA CALCITE ET DES DONNÉES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES

### A) Détermination des contraintes différentielles

Les valeurs ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) déterminées par inversion des données de macles (tabl. II) varient entre 43 et 71 MPa pour les tenseurs post-plissement (soit une valeur moyenne de  $60 \pm 15$  MPa,  $\pm 15$  désignant non pas l'incertitude standard, mais la gamme de valeurs obtenues), et entre 71 MPa et 172 MPa pour les tenseurs anté-plissement. Ces derniers s'avèrent donc associés à des contraintes différentielles principales plus variables ( $120 \pm 50$  MPa) et beaucoup plus fortes.

Les incertitudes sur les valeurs des contraintes différentielles ont été discutées plus haut. Cependant, les incertitudes liées à la comparaison, dans un même endroit et dans un même matériau, des magnitudes des contraintes différentielles anté et post-basculément (c'est-à-dire des incertitudes « relatives ») sont certainement plus faibles que les incertitudes « absolues » sur les grandeurs de ces contraintes. La différence de magnitude entre les contraintes anté et post-basculément calculées est certainement significative. D'ailleurs, la dispersion des magnitudes des contraintes différentielles post-plissement est acceptable ( $\pm 25\%$  par rapport à la valeur moyenne de 60 MPa). Nous concluons que pour la dispersion des magnitudes anté-plissement, une origine géologique (et non méthodologique) doit être recherchée.

Si on admet que ces fortes contraintes prévalaient avant/pendant le plissement, cette dispersion reflète probablement des variations de la profondeur d'enfouissement (la contrainte différentielle augmentant avec la profondeur) lors de la formation et de l'érosion quasi-simultanée de l'anticlinal de rampe. L'exhumation rapide (contemporaine de la compression) des terrains pliocènes lors du fonctionnement de la rampe rend compte de la forte dispersion des contraintes différentielles calculées. Le chevauchement a dans un second temps abandonné la rampe pour une autre plus externe, d'où un ralentissement de la surrection et l'érosion du pli étudié, une stabilisation de la profondeur d'enfouissement, expliquant l'obtention de contraintes différentielles post-plissement moindres et plus homogènes. Cette interprétation sera retenue par la suite ; cependant, compte tenu du manque de contrôle sur ces différentes étapes, nous considérerons seulement un état de contrainte « moyen » anté / syn-plissement, et nous adopterons une valeur moyenne de 120 MPa pour les contraintes différentielles anté-plissement.

On met ainsi en évidence un net contraste de magnitudes, au cours de la même phase tectonique (compression NW-SE), entre les contraintes différentielles responsables des structures anté-basculément et du plissement lui-même et les contraintes différentielles ayant prévalu après le plissement.

### B) Principe de la détermination des grandeurs des contraintes principales

L'inversion des données de macles permet donc de déterminer les valeurs des contraintes différentielles ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) et ( $\sigma_2 - \sigma_3$ ). La valeur de la contrainte différentielle ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) fixe l'échelle (le diamètre) du cercle de Mohr ( $\sigma_3, \sigma_1$ ) associé au tenseur (fig. 8). L'état de contraintes est alors connu à un facteur isotrope près. Le paramètre manquant correspond soit à la valeur d'une des trois contraintes principales, soit à une relation supplémentaire entre leurs magnitudes, donnée par exemple par la pression moyenne ( $\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ )/3.

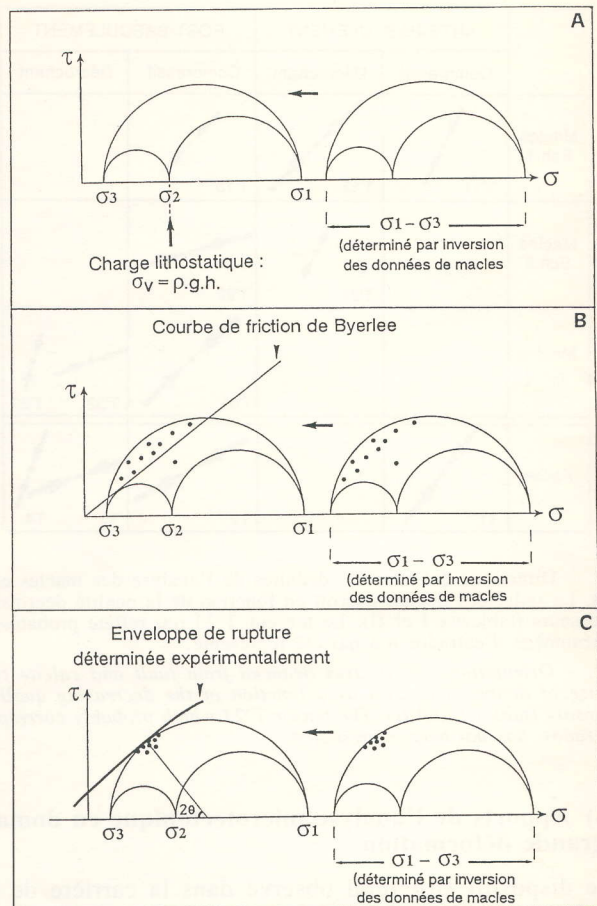


FIG. 8. – Principe de la quantification des contraintes fondées sur la combinaison de l'analyse des macles de la calcite et des données de la mécanique des roches.

A : macles de la calcite et estimation de la charge lithostatique dans le cas d'un système en décrochement ( $\sigma_2$  vertical).

B : macles de la calcite et failles héritées (courbe de friction).

C : macles de la calcite et failles néoformées (courbe de néorupture).  $2\theta$  désigne l'angle entre les cisaillements conjugués.

FIG. 8. – Principle of the determination of principal stress magnitudes based on combining calcite twins and rock mechanics data.

A : calcite twins and estimate of lithostatic load for strike-slip regime ( $\sigma_2$  vertical).

B : calcite twins and inherited faults (friction curve).

C : calcite twins and rupture curve (newlyformed faults).  $2\theta$  corresponds to the angle between conjugate faults.

Diverses sources d'information sont disponibles pour déterminer ce dernier paramètre ; leur utilisation nécessite un certain nombre de conditions [Lacombe et Laurent, 1992], qui ne seront que brièvement résumées.

**1) L'enfouissement :** à cause de la surface libre terrestre, une des trois contraintes principales est généralement verticale. Cette contrainte  $\sigma_v$  correspond à  $\sigma_1$  en régime extensif,  $\sigma_2$  en régime décrochant et  $\sigma_3$  en régime compressif. La détermination de la paléoprosfondeur d'enfouissement à l'époque de l'événement tectonique considéré fixe la magnitude de la contrainte verticale  $\sigma_v$  contemporaine de la déformation, donc la composante isotrope du tenseur (fig. 8A).

Notons que la valeur de  $\sigma_v$  ne prend pas en compte la pression de fluides. En fait, avec une porosité ouverte, les contraintes effectives varient entre les contraintes effectives à sec (limite supérieure) et les contraintes effectives quand la roche est saturée en fluides (limite inférieure). La pres-

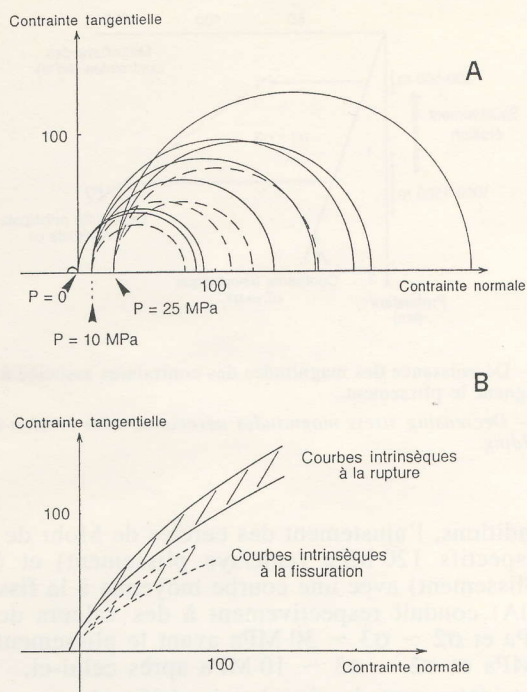


FIG. 9. — A. Cercles de Mohr correspondant aux essais en compression et « brésilien ». Les cercles continus correspondent à la rupture ( $\sigma_1-P$ ), les cercles en tiretés à la fissuration ( $\sigma_1-P$ )'.

Exp. 1 : résistance à la traction : 7 MPa

Exp. 2 : P = 0 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 85 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 90 MPa;

Exp. 3 : P = 10 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 130 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 190 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>3</sub> = 161 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 60 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 100 MPa;

Exp. 4 : P = 25 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 185 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 260 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 100 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 150 MPa;

B. Courbes à la rupture (en continu) et à la fissuration (tiretés) déduites des résultats précédents. Noter la dispersion liée à l'hétérogénéité du matériau.

FIG. 9. — A. Mohr circles corresponding to compression and « brésilien » experiments. The continuous circles correspond to rupture ( $\sigma_1-P$ ), the dashed circles to fissuration ( $\sigma_1-P$ )'.

Exp. 1 : tension strength : 7 MPa

Exp. 2 : P = 0 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 85 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 90 MPa;

Exp. 3 : P = 10 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 130 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 190 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>3</sub> = 161 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 60 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 100 MPa;

Exp. 4 : P = 25 MPa, ( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 185 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 260 MPa;

( $\sigma_1-P$ )<sub>1</sub> = 100 MPa; ( $\sigma_1-P$ )<sub>2</sub> = 150 MPa;

B. Intrinsic curves (continuous : fresh failure, dashed : fissuration) deduced from previous experimental results. Note the dispersion due to the heterogeneity of the material.

sion de fluides à l'époque de la déformation étant inconnue, nos estimations doivent être considérées comme des valeurs maximales.

2) **La friction** : la courbe de friction [Byerlee, 1978] permet de préciser les grandeurs des contraintes principales [Angelier, 1989] en fixant, par exemple, la position des cercles de Mohr le long de l'axe des contraintes normales, de telle sorte que les failles réactivées se projettent au-dessus de la courbe de friction (fig. 8B).

3) **La néorupture** : l'existence de la courbe de rupture intrinsèque de la roche permet de lier la taille du grand cercle de Mohr à une position donnée sur l'axe des contraintes normales [Angelier, 1989; Lacombe et Laurent, 1992]. Ceci s'illustre aisément dans le diagramme de Mohr : le grand cercle de Mohr ( $\sigma_3, \sigma_1$ ) correspondant à

un état de contraintes donné tangente à cette courbe pour les fractures néoformées.

La similitude des tenseurs reconstitués à Yutengping par l'analyse des failles et des macles indique qu'il s'agit de tenseurs « contemporains » à l'échelle des temps géologiques, c'est-à-dire liés au même épisode tectonique. De plus, la magnitude de la contrainte différentielle estimée à l'aide des macles correspond au pic de contrainte de l'événement, donc très probablement à la contrainte différentielle qui a provoqué la néorupture. Dans ces conditions, l'ajustement du cercle de Mohr ( $\sigma_3, \sigma_1$ ) obtenu par les macles avec la courbe intrinsèque de rupture se justifie théoriquement et permet de fixer les valeurs de  $\sigma_1, \sigma_2$  et  $\sigma_3$  au moment de la rupture (fig. 8C). Cette approche combinée macles-mécanique des roches exigeant la connaissance des propriétés du matériau rocheux affecté, nous avons effectué des essais mécaniques sur des échantillons recueillis dans le site de Yutengping (fig. 9).

### C) Détermination des courbes intrinsèques à la rupture et à la fissuration du calcaire de Yutengping

Les courbes intrinsèques à la rupture et à la fissuration ont été déterminées en laboratoire sur des échantillons de roche soumis à des essais triaxiaux cylindriques de compression (laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique). Ce type d'essai consiste à soumettre une éprouvette cylindrique à une pression de confinement P ( $P = \sigma_2 = \sigma_3$ ), maintenue constante et à laquelle on superpose une contrainte différentielle ( $\sigma_1-P$ ) provoquant la rupture. Les déformations des éprouvettes (25 mm de diamètre, élancement 2) ont été suivies par l'intermédiaire de jauges extensométriques directement collées sur celles-ci. Les échantillons ont été déformés sous des pressions de confinement de 0 MPa (compression simple), 10 et 25 MPa; un essai brésilien a fourni, en outre, une approximation de la résistance à la traction de la roche. Les valeurs correspondantes de ( $\sigma_1-P$ ) ont été déterminées à la rupture, mais aussi à la fissuration (dilatance précédant la rupture macroscopique) (fig. 9A), afin de prendre en compte l'effet d'hétérogénéité et de préfracturation de la roche au cours de la déformation naturelle.

Les éprouvettes sur lesquelles les expériences ont été réalisées ont préalablement été soumises à un test de vitesse des ondes de compression (ondes P). Pour une éprouvette de 50 mm de longueur, les temps de parcours s'échelonnent de 8,5 à 10  $\mu$ s, ce qui traduit une hétérogénéité du matériau. Effectivement, quoique similaires à l'œil nu, les deux échantillons dans lesquels ont été taillées les éprouvettes ont donné des valeurs ( $\sigma_1-P$ ) à la fissuration et la rupture différentes (fig. 9A), ce qui se traduit par une dispersion des courbes de fissuration et de néorupture (fig. 9B).

La dispersion des courbes intrinsèques à la fissuration et à la rupture traduit une hétérogénéité importante du matériau récifal, comme cela avait déjà été noté dans les calcaires grossiers [Porjesz et al., 1994]. Cette dispersion est cependant faible dans le domaine des faibles pressions de confinement. Compte tenu des grandeurs des contraintes différentielles considérées, elle n'introduira pas de biais important sur nos estimations.

Par ailleurs, comme l'avaient fait Bergerat et al. [1985], nous considérons que la fissuration expérimentale, compte tenu de la qualité du matériau, de son hétérogénéité et de son degré de préfracturation, reflète mieux que la néorupture les conditions de la déformation cassante naturelle (fig. 10).

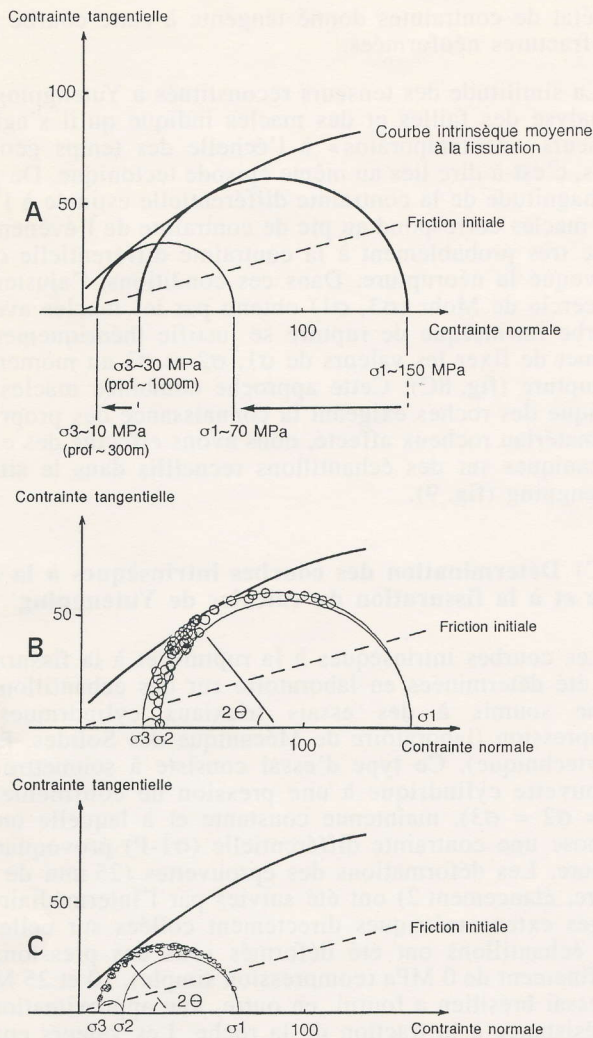


FIG. 10. – A. Evolution des magnitudes des contraintes avant et après le plissement pour la compression N130°E.  
 B. Ajustement des cercles de Mohr et des failles associées à la compression N141°E anté-plissement à la courbe de fissuration et à la courbe de friction initiale [Byerlee, 1978].  
 C. Ajustement des cercles de Mohr et des failles associées à la compression décrochante N109°E post-plissement à la courbe de fissuration et à la courbe de friction initiale.  $2\Theta$  correspond à l'angle entre les cisaillements conjugués.

FIG. 10. – A. Evolution of stress magnitudes before and after folding for the N130° compression.  
 B. Fit of the Mohr circles and corresponding fault slip data associated with N141° pre-tilt compression with the fissuration curve and the initial friction curve [Byerlee, 1978].  
 C. Fit of the Mohr circles and corresponding fault slip data associated with N109° post-tilt compression with the fissuration curve and the initial friction curve.  $2\Theta$  corresponds to the angle between conjugate faults.

#### D) Essai de quantification des paléocontraintes associées au plissement

Utilisant les paramètres déterminés par les essais mécaniques et les trois approches mentionnées plus haut (enfouissement, friction, rupture), nous obtenons à Yutengping une estimation des magnitudes des contraintes principales. Il faut toutefois conserver à l'esprit que les multiples sources d'incertitudes sur nos déterminations n'autorisent à retenir que des ordres de grandeur.

Régimes décrochants, compressifs et plissement ayant « alterné » au cours de la compression N130°, les contraintes  $\sigma_2$  et  $\sigma_3$  moyennes ont eu des valeurs proches, situation favorable à des permutations des axes correspondants. Dans

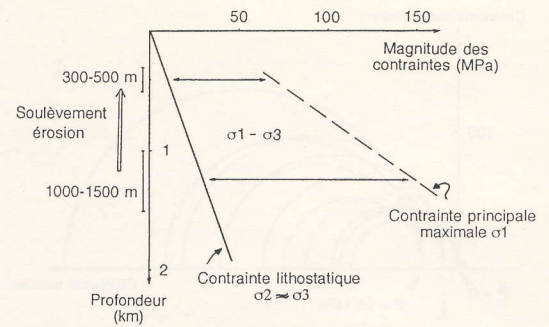


FIG. 11. – Décroissance des magnitudes des contraintes associée à l'érosion accompagnant le plissement.

FIG. 11. – Decreasing stress magnitudes associated with erosion accompanying folding.

ces conditions, l'ajustement des cercles de Mohr de diamètres respectifs 120 MPa (anté/syn plissement) et 60 MPa (post-plissement) avec une courbe moyenne à la fissuration (fig. 10A) conduit respectivement à des valeurs de  $\sigma_1 \sim 150$  MPa et  $\sigma_2 \sim \sigma_3 \sim 30$  MPa avant le plissement, et  $\sigma_1 \sim 70$  MPa et  $\sigma_2 \sim \sigma_3 \sim 10$  MPa après celui-ci.

Il est intéressant de chercher à vérifier la compatibilité de ces estimations avec les données géologiques. Les états de contraintes étant décrochants-compressifs, la valeur commune  $\sigma_2 \sim \sigma_3$  est celle de la contrainte verticale liée au poids des terrains surincombants,  $\sigma_v = \rho g h$  à sec ( $h$  désignant l'épaisseur des terrains et  $\rho$  leur masse volumique). Cette épaisseur peut être estimée à environ 1000-1500 m avant plissement et 300-500 m après plissement (fig. 10A). A partir de la synthèse stratigraphique de Ho [1986], on peut estimer que, la déformation dans cette région des Foothills étant d'âge pliocène terminal-pléistocène basal [Angelier *et al.*, 1986; Chu, 1990], la couverture des terrains à l'époque de la déformation était représentée par le Pliocène supérieur. Ceci représente une épaisseur d'environ 1,5 km, compatible avec l'épaisseur anté-plissement suggérée par nos estimations. Cela nous conduit à envisager une érosion contemporaine du plissement, à la fin du Pliocène, d'environ 700-1000 m de terrains dans le secteur étudié (fig. 11).

On peut également éprouver nos estimations en vérifiant leur compatibilité avec les systèmes de failles mesurés sur le terrain, en termes de friction-réactivation. Par exemple, les figures 10B et 10C montrent que les failles associées à la compression N141°E anté-plissement et à la compression décrochante N109°E post-plissement, associées à des rapports  $\Phi$  faibles (tabl. I), se projettent dans le diagramme de Mohr au-dessus de la courbe de friction initiale définie par Byerlee [1978]. Ces failles ont donc pu jouer dans les états de contraintes caractérisés par les magnitudes calculées.

#### VI. – CONCLUSION

Avec l'exemple du plissement affectant les calcaires récifaux pliocènes de Yutengping, nous avons caractérisé l'évolution des contraintes responsables du développement d'un pli et aussi celles postérieures à sa formation. Cette caractérisation a exigé une analyse de l'histoire de la déformation (bien que l'évolution 3D des structures n'ait pas été prise en compte pour l'interprétation cinématique du plissement, compte tenu des éléments de symétrie du pli), une reconstitution détaillée des orientations des contraintes principales et un raisonnement de mécanique des roches contraint par des déterminations sur éprouvettes.

TABLE I. – Tenseurs de contraintes déterminés par l'analyse des failles. Direction et plongement des axes de contraintes, en degrés. Les étoiles indiquent la disposition des axes du tenseur après débasculement de la stratification.  $\Phi$ , défini dans le texte. N : nombre de données de failles expliquées par le tenseur. ANG : angle moyen entre strie réelle et strie calculée, en degrés. Qu : qualité du tenseur (A à D), estimée en fonction du nombre de failles expliquées, de la variété de leurs orientations et de la valeur ANG.

TABLE I. – Stress tensor determination based on fault slip data. Trend and plunge of each stress axis, in degrees. Stars : stress tensor attitude after backtilting of the bedding plane.  $\Phi$  defined in text. N : number of faults consistent with the tensor. ANG : average angle between actual and calculated striae, in degrees ; Qu : quality of the tensor (A to D) estimated according to the number of faults explained, the variety of their orientations and the ANG value.

Réf	$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$	$\Phi$	N	ANG	Qu
T1	311-74 * 141-23	055-04 234-06	141-15 337-67	0.06	65	14	A
T2	300-04	209-13	047-76	0.54	33	14	A
T3	289-07	180-69	022-20	0.17	124	14	A
T4	338-22	213-55	080-26	0.49	31	14	B

Il ressort de notre étude que la plupart des fractures et macles se sont formées avant et après le plissement. La déformation cassante a donc alterné avec la déformation pllicative à l'échelle du système rampe-pli (cette dernière impliquant des glissements banc-sur-banc et des phénomènes de pression-dissolution). La compression régionale s'est exprimée au départ par des régimes compressifs et décrochants, la contrainte verticale étant tantôt  $\sigma_2$ , tantôt  $\sigma_3$ . Puis, la compression continuant, le pli s'est développé : le plissement et la progression de l'unité chevauchante ont provoqué une surrection couplée à l'érosion du relief ainsi formé, ce qui entraîne une diminution de la surcharge lithostatique, donc une diminution de la contrainte différentielle au cours du même épisode compressif. Au cours des stades tardifs du plissement ou après celui-ci, de nouveaux systèmes de failles inverses, décrochements et macles de la calcite se sont développés à Yutengping, mais à une profondeur moindre et sous des contraintes différentielles moins fortes.

Ce travail fournit un argument quantitatif en faveur de variations importantes des grandeurs des contraintes lors du plissement au cours d'une phase tectonique, malgré des incertitudes encore notables. Des études ultérieures sont nécessaires afin de pouvoir confirmer et généraliser ces conclusions.

Remerciements. – Les auteurs remercient les deux rapporteurs pour leur lecture scrupuleuse du manuscrit et leurs suggestions d'amélioration, ainsi que l'Institut Français à Taipei, le « National Science Council » et le « Central Geological Survey » pour leur soutien.

ALLMENDINGER R.W. & JORDAN T.E. (1984). – Mesozoic structure of the Newfoundland Mountains, Utah : horizontal shortening and subsequent extension in the hinterland of the Sevier belt. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **95**, 1280-1292.

ANGELIER J. (1975). – Sur l'analyse de mesures recueillies dans des sites faillés : l'utilité d'une confrontation entre les méthodes dynamiques et cinématiques. – *C.R. Acad. Sci.*, D, **281**, 1805-1808 (erratum ; *ibid.*, 1976, **283**, 466).

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

TABLE II. – Tenseurs de contraintes déterminés par l'analyse des macles de la calcite. Direction et plongement des axes de contraintes, en degrés. Les étoiles indiquent la disposition des axes du tenseur après débasculement de la stratification.  $\Phi$ , défini dans le texte. f = valeur de la fonction de pénalisation :

$$f = \sum_{j=1}^N (\tau_{sj} - \tau_a')$$

où  $\tau_{sj}$  est la CCR exercée sur les N plans non maclés j tels que  $\tau_{sj} > \tau_a'$  et  $\tau_a'$  la plus petite valeur de la CCR obtenue sur les plans maclés pris en compte dans la solution.

N1 : nombre total de données de macles ; N2 : nombre de données de macles expliquées par le tenseur ; Nt : nombre de plans maclés ; Nu : nombre de plans non maclés ; Qu : qualité du tenseur (A à D) estimée en fonction du pourcentage de plans maclés expliqués par le tenseur ( $N2t/N1t$ ), du pourcentage de plans non maclés compatibles avec la solution ( $N2u/N1u$ ) et de l'ordre d'obtention du tenseur. ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) : contrainte différentielle principale (MPa).

TABLE II. – Stress tensor determination based on calcite twin data. Trend and plunge of each stress axis, in degrees. Stars : stress tensor attitude after backtilting of the bedding plane.  $\Phi$  defined in text. f, value of the penalization function

$$f = \sum_{j=1}^N (\tau_{sj} - \tau_a')$$

where  $\tau_a'$  is the smallest resolved shear stress applied on the twinned planes accounted for by the tensor and  $\tau_{sj}$  the resolved shear stresses applied on the N untwinned planes j such as  $\tau_{sj} > \tau_a'$ .

N1 : total number of twin data ; N2 : number of twin data consistent with the tensor ; Nt : number of twinned planes ; Nu : number of untwinned planes ; Qu : quality of the tensor (A to D) estimated according to the percentage of twinned planes explained by the solution ( $N2t/N1t$ ), to the percentage of untwinned planes consistent with the solution ( $N2u/N1u$ ) and to the order of obtention of the tensor. ( $\sigma_1$ - $\sigma_3$ ) : principal differential stress (MPa).

Echant	Réf	Axes de contraintes			$\Phi$	f	N1		N2		$\sigma_1$ - $\sigma_3$	Qu
		$\sigma_1$	$\sigma_2$	$\sigma_3$			Nt	Nu	Nt	Nu		
Ech 1	$\tau_{11}$	175-66 * 333-12	010-24 074-38	277-05 229-48	0.61	0.13	96	23	48	21	119	B
	$\tau_{12}$	013-84 * 134-11	130-03 277-77	220-06 042-08	0.5	0.0	252	24	93	24	172	A
	$\tau_{13}$	136-00	226-06	046-84	0.38	0.0	159	23	63	23	63	B
Ech 2	$\tau_{21}$	279-68 * 154-23	184-02 039-44	094-22 264-37	0.84	0.30	171	28	68	25	71	C
	$\tau_{22}$	286-01	195-06	028-84	0.44	0.04	227	28	56	27	45	A
	$\tau_{23}$	032-31	258-49	137-24	0.23	0.00	103	28	56	28	120	A
Ech 3	$\tau_{31}$	312-39	213-11	110-49	0.35	0.12	171	31	76	28	64	A
	$\tau_{32}$	288-24	122-66	020-05	0.05	0.11	96	30	28	28	71	B
	$\tau_{33}$	164-37	348-53	256-02	0.37	0.13	68	30	27	24	43	D

Références

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

ANGELIER J., BERGERAT F. & CHU H.-T. (1986). – Plate collision and paleostress trajectories in a fold thrust belt : the Foothills of Taiwan. – *Tectonophysics*, **125**, 161-478.

BARRIER E. (1985). – Tectonique d'une chaîne de collision active : Taiwan. – *Mém. Sci. Terre, Univ. P. et M. Curie*, **85-29**, Paris, 492 p.

BERGERAT F., BERGUES J. & GEYSSANT J. (1985). – Estimation des paléo-contraintes liées à la formation de décrochements dans la plate-forme d'Europe du nord. – *Geol. Rundsch.*, **74**, 311-320.

- BOTT M.H.P. (1959). – The mechanism of oblique slip faulting. – *Geol. Mag.*, **96**, 2, 109-117.
- BYERLEE J.D. (1978). – Friction of rocks. – *Pure and Applied Geoph.*, **116**, 615-626.
- 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.*, (D), **279**, 891-894.
- CHI W.R. (1980). – Calcareous nannoplankton biostratigraphic study and correlation of the late Neogene sequence in the Chiayi and Hsiinying foothills, southern Taiwan. – *Proc. Geol. Soc. China*, **23**, 16-28.
- CHOUKROUNE P. & SEGURET M. (1968). – Un exemple de relations entre joints de cisaillement, fentes de tension, plis et schistosité. – *Rev. Géog. phys. Géol. dyn.*, **10**, 239-246.
- CHU H.-T. (1990). – Neotectonique cassante et collision plio-quadernaire à Taiwan. – *Mém. Sci. Terre Univ. P. et M. Curie*, **90-28**, Paris, 292 p.
- CRADDOCK J.P., JACKSON M., VAN DE PLUJM B. & VERSICAL R.T. (1993). – Regional shortening fabrics in eastern north America : far-field stress transmission from the Appalachian-Ouachita orogenic belt. – *Tectonics*, **12**, 1, pp. 257-264.
- DEFFONTAINES B., LEE J.-C., ANGELIER J., CARVALHO J. & RUDANT J.-P. (1994). – New geomorphic data on the active Taiwan orogen : a multisource approach. – *J. Geophys. Res.*, **99**, B10, 20243-20266.
- DIETRICH D. & SONG H. (1984). – Calcite fabrics in a natural shear environment, the Helvetic nappes of western Switzerland. – *J. Struct. Geol.*, **6**, 19-32.
- ETCHECOPAR A. (1984). – Etude des états de contraintes en tectonique cassante et simulation de déformations plastiques (approche mathématique). – Thèse Sci., 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.*, **8**, IV, 289-302.
- ETCHECOPAR A., VASSEUR G. & DAIGNIERES M. (1981). – An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensor from fault striation analysis. – *J. Struct. Geol.*, **3**, 51-65.
- FRIEDMAN M. (1967). – Description of rocks and rock masses with a view to their physical and mechanical behaviour. – *1st Intern. Cong. Rock Mechanics Proc.*, **3**, 182-197.
- FRIEDMAN M. & HEARD H.C. (1974). – Principal stress ratios in Cretaceous limestones from Texas Gulf coast. – *AAPG. Bull.*, **58**, 1, 71-78.
- FRIEDMAN M. & STEARNS D.W. (1971). – Relations between stresses derived from calcite twin lamellae and macrofractures, Teton anticline, Montana. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **82**, 3151-3162.
- FRIEDMAN M., TEUFEL D.W. & MORSE J.D. (1976). – Strain and stress analyses from calcite twin lamellae in experimental buckles and faulted drape-folds. – *Phil. Trans. R. Soc. London*, **283**, 87-107.
- HIPPOLYTE J.C. (1992). – Tectonique de l'Apennin méridional : structures et paléocontraintes d'un prisme d'accrétion continental. – *Mém. Sci. Terre, Univ. P. et M. Curie*, **92-5**, 245 p.
- HO C.S. (1986). – A synthesis of the geologic evolution of Taiwan. – *Tectonophysics*, **125**, 1-16.
- HOMBERG C., ANGELIER J., BERGERAT F. & LACOMBE O. (1995). – Paleostress reconstruction and stress deviation near large fault zones in the Jura mountains. – *Terra Abstracts*, EUG VIII, Strasbourg, 9-13 Avril 1995, p. 269.
- JAMISON W.R. & SPANG J. (1976). – Use of calcite twin lamellae to infer differential stresses. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **87**, 868-872.
- LACOMBE O., ANGELIER J., LAURENT P., BERGERAT F. & TOURNERET C. (1990). – Joint analyses of calcite twins and fault slips as a key for deciphering polyphase tectonics : Burgundy as a case study. – *Tectonophysics*, **182**, 279-300.
- LACOMBE O., ANGELIER J. & LAURENT P. (1993). – Les macles de la calcite, marqueurs des compressions récentes dans un orogène actif : L'exemple des calcaires récifaux du sud de Taiwan. – *C.R. Acad. Sci.*, Paris, **316**, 1805-1813.
- LACOMBE O. & LAURENT P. (1992). – Determination of principal stress magnitudes using calcite twins and rock mechanics data. – *Tectonophysics*, **202**, 83-93.
- LACOMBE O. & LAURENT P. (1996). – Determination of deviatoric stress tensors based on inversion of calcite twin data from experimentally deformed monophase samples : preliminary results. – *Tectonophysics* (sous presse).
- LAURENT P. (1984). – Les macles de la calcite en tectonique : nouvelles méthodes dynamiques et premières applications. – Thèse Sci., Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 324 p.
- LAURENT P., BERNARD P., VASSEUR G. & ETCHECOPAR A. (1981). – Stress tensor determination from the study of e twins in calcite : a linear programming method. – *Tectonophysics*, **78**, 651-660.
- LAURENT P., TOURNERET C. & LABORDE O. (1990). – Determining deviatoric stress tensors from calcite twins. Application to monophase synthetic and natural polycrystals. – *Tectonics*, **9**, 3, 379-389.
- NISSEN H.U. (1964). – Dynamic and kinematic of crinoids stems in a quartz grauwacke. – *J. Geol.*, **72**, 346-360.
- OLSSON W.A. (1974). – Grain size dependence of yield stress in marble. – *J. Geophys. Res.*, **79**, 4859-4862.
- PETIT J.-P. & MATTAUER M. (1995). – Palaeostress superimposition deduced from mesoscale structures in limestone : the Matelles exposure, Languedoc, France. – *J. Struct. Geol.*, **17**, 2, 245-256.
- PIFFNER O.A. & BURKHARD M. (1987). – Determination of paleostress axes orientations from fault, twin and earthquake data. – *Ann. Tect.*, **1**, 48-57.
- PORJESZ R., LUONG M.P. & BERGERAT F. (1994). – Etude statistique de la résistance à la rupture d'un calcaire grossier. – *15<sup>e</sup> RST*, Nancy, SGF éd., p. 128.
- ROCHER M. (1994). – La déformation microscopique des calcaires récifaux quaternaires de Taiwan : de l'analyse des macles de la calcite à la quantification des contraintes au front d'une chaîne de collision. – D E A inédit, Université P. et M. Curie, 62 p. (en dépôt à la SGF).
- ROWE K.J. & RUTTER E.H. (1990). – Paleostress estimation using calcite twinning : experimental calibration and application to nature. – *J. Struct. Geol.*, **12**, 1, 1-17.
- SUPPE J. (1980). – Imbricated structure of western Foothills belt, south-central Taiwan. – *Petrol. Geol. Taiwan*, **17**, 1-16.
- SUPPE J. (1981). – Mechanics of mountain-building and metamorphism in Taiwan. – *Geol. Soc. China, Mem.*, **4**, 67-90.
- TENG L.S. (1987). – Stratigraphic records of the late Cenozoic Penglai orogeny of Taiwan. – *Acta Geol. Taiwan*, **25**, 205-224.
- TENG L.S. (1990). – Geotectonic evolution of late Cenozoic arc-continent collision in Taiwan. – *Tectonophysics*, **183**, 57-76.
- 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 Sci., Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 196 p.
- TOURNERET C. & LAURENT P. (1990). – Paleostress orientations from calcite twins in the north Pyrenean foreland, determined by the Etche- copar inverse method. – *Tectonophysics*, **180**, 287-302.
- TULLIS T.E. (1980). – The use of mechanical twinning in minerals as a measure of shear stress magnitudes. – *J. Geophys. Res.*, **85**, 6263-6268.
- TURNER F.J. (1953). – Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. – *Am. J. Sci.*, **251**, 276-298.
- TURNER F.J., GRIGGS D.T. & HEARD H. (1954). – Experimental deformation of calcite crystals. – *Geol. Soc. Amer. Bull.*, **65**, 883-934.
- TURNER F.J. & HEARD H.C. (1965). – Deformation in calcite crystals at different strain rates. – *Univ. Calif. Publ. Geol. Sci.*, **46**, 103-126.
- 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 Sci., Univ. Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, 152 p.
- WENK H.R., BARBER D.J. & REEDER R.J. (1983). – Microstructures in carbonates. – *Rev. Mineral.*, **11**, 301-367.