

## Déformation cataclastique plastique lors du plissement, sous faible couverture, de strates calcaires

Par ANDRÉ DROXLER<sup>1)</sup> et JEAN-PAUL SCHAEER<sup>2)</sup>

### RÉSUMÉ

L'analyse de plis métriques et décimétriques dans les formations calcaires du Jura (Hauterivien et Argovien) montre que le plissement se fait sans déformation interne appréciable. Au cours de l'évolution des plis, des ruptures induites par cisaillement et traction transforment les strates en un ensemble de morceaux semi-indépendants dont la géométrie extérieure est modifiée par dissolution dans les zones de surpression. Une partie du matériel dissous dans les plans de joints stylolithiques se redépose dans les fentes d'extension. La déformation cataclastique plastique (allure plastique de la géométrie de l'ensemble - cataclastique au niveau du mécanisme de la déformation) se fait par modification de la géométrie des éléments unitaires rigides qui, pour s'adapter aux courbures, subissent de faibles translations et rotations par rapport à leurs voisins immédiats. Au cours du plissement, tant que la courbure reste faible, les joints stylolithiques sont particulièrement agissants dans des plans perpendiculaires aux couches; ils conduisent à des plis de type concentrique. Avec l'accentuation de la déformation, on voit apparaître des plans stylolithiques parallèles au plan axial; les plis évoluent alors vers des plis de type similaire.

### ABSTRACT

The analyses of metric and decimetric folds of thin bedded limestone (Hauterivian and Argovian of the Jura) show that folding develops without important internal deformation. During the evolution of folds, ruptures induced by shearing and traction transform the layers into semi-independent groups of fragments, the outside geometry of which is modified by dissolution in over-pressured zones. Part of the dissolved material in stylolitic plans is redeposited in extension cracks. Cataclastic by its mechanism of deformation, plastic by its general geometrical outlook, the folding takes place with the modification of the geometry of rigid elements which can thus undergo slight translation or rotation with respect to their close neighbours. During folding as long as the curvature remains small, the stylolitic joints are particularly active in plans perpendicular to the bedding, they lead to a concentric type of folds. With increase of deformation, stylolitic plans parallel to the axial surface are beginning to be very active; the folds evolve then towards those of similar type.

### 1. Introduction

Il est admis que les séries calcaires déformées sous faible couverture (200 à 2000 m) évoluent, lorsqu'elles sont ployées, en plis isopaques. Les phénomènes de flexions et glissements sont les principaux mécanismes invoqués pour parvenir à cette géométrie. Les glissements relatifs banc sur banc se confirment par la présence

<sup>1)</sup> Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, Department of Marine Geology and Geophysics, University of Miami, 4600 Rickenbacker Causeway, Miami, Florida 33149, USA.

<sup>2)</sup> Institut de Géologie, 11, rue Emile-Argand, 2000 Neuchâtel (Suisse).

de stries observées sur les bancs; ces stries évoquent les mouvements différentiels, souvent favorisés par de petits interlits marneux ou argileux. Si ce mécanisme est généralement reconnu, peu de recherches ont essayé d'analyser la manière dont se faisait la flexion. Dans le régime où pression et température sont faibles, les calcaires demeurent cassants car les possibilités de déformations internes et continues restent très limitées, surtout si la porosité de matrice est très réduite et cette situation existe souvent déjà avant le plissement.

Le Jura offre un excellent champ d'investigation pour ce type de recherche. Plissée sous une faible surcharge (inf. à 3000 m) une alternance d'horizons calcaires plus ou moins épais, plus ou moins purs (niveaux compétents) sont encadrés par des horizons marneux qui favorisent les mouvements disharmoniques et différentiels de couche à couche. LAUBSCHER (1977) a pu montrer que, généralement, la géométrie des anticlinaux s'écarte sensiblement de l'image simple d'une voûte régulière à rayon de courbure presque constant, ou de type sinusoidal. Pour cet auteur les plis ont souvent, mais pas toujours, des allures de mega-kink à charnières arrondies. Il propose des modèles d'évolution où charriage et kink sont associés. Délaissant cet aspect du problème, nous allons principalement concentrer notre attention sur les phénomènes rencontrés dans les charnières et dans l'évolution des plis de petite dimension, en examinant tout particulièrement ce qui tient lieu de flexion (cf. également LAUBSCHER 1979).

SCHARDT (1905) et RICKENBACH (1925) ont décrit une suite de replis dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur et du Barrémien du flanc N du synclinal du Val-de-Travers (voir profils SCHARDT et RICKENBACH) (fig. 1). Les conditions d'affleurement, leur accessibilité, la grandeur des objets permettent une analyse géométrique aisée ainsi qu'une intégration facile des données recueillies dans des ordres de

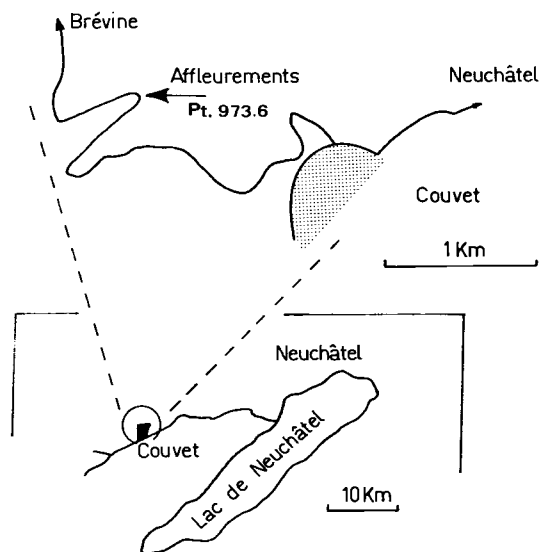


Fig. 1. Localisation des plis dans les calcaires au lieu-dit «Au-dessus la Prise» Pt. 973.6, sur la route Couvet-La Brévine.

grandeur différents (ensembles décamétriques, échantillons, lames minces). Cette situation comportait cependant un certain nombre d'inconvénients, dans la mesure où le style des plis diffère sensiblement de celui des grandes voûtes anticlinales du Jura, principalement au niveau de l'ampleur des plis, des rayons de courbure, des longueurs d'ondes, etc. ... Cependant, dans l'ensemble, les avantages paraissent l'emporter.

Les strates ployées, objet de cet article, appartiennent à l'Hauterivien supérieur dont les calcaires oobiopelsparites forment un ensemble lithologique épais d'une vingtaine de mètres dans lesquels les interlits marneux sont absents ou très peu importants. La porosité de matrice est en général très faible, même dans les secteurs voisins non perturbés. Le plissement est daté du Mio-Pliocène et doit s'être fait sous une couverture de quelques centaines de mètres au plus.

## 2. Description et étude générale de la série plissée

### *Description des plis*

La figure 2 donne une représentation de la partie de l'affleurement étudié; le plan de coupe est pratiquement perpendiculaire aux axes des plis locaux et régionaux. Plusieurs plis se distinguent (anticlinal I, synclinal II, anticlinaux III et IV) qui évoquent à première vue soit des plis concentriques soit des plis d'allure similaire, dont les plans axiaux sont subverticaux. Un plan de disharmonie interne recoupe les plis I à III. A l'échelle de l'affleurement, les différents bancs offrent une belle continuité et l'allure générale des plis fait penser à une déformation souple.

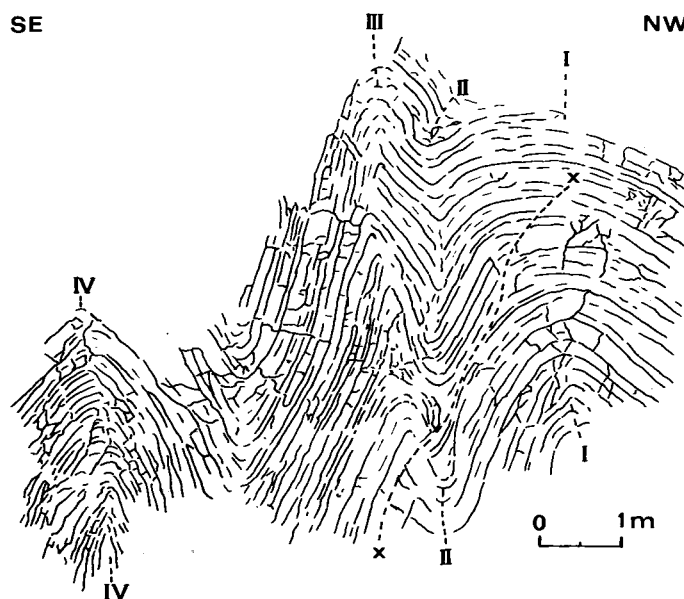


Fig. 2. Affleurement du Pt. 973.6, «Au-dessus la Prise» dans les calcaires de l'Hauterivien. I-IV = suite d'anticlinaux et de synclinaux, avec indication de la trace du plan axial; ×-----×: trace de chevauchement interne et disharmonie.

### *Analyse géométrique globale des plis*

La géométrie des anticlinaux I et III, et du synclinal II a été examinée selon les trois paramètres suivants:

$t$  = épaisseur des bancs, mesurée perpendiculairement à la surface de stratification;

$T$  = épaisseur des bancs, mesurée dans une direction parallèle au plan axial;

$R$  = rayon de courbure des bancs.

#### *Anticlinal I (fig. 3 A)*

Au niveau de l'extrados  $M$ , d'une couche de référence, les épaisseurs  $t$  et  $T$  décroissent du SE au NW; sans être marquée par des particularités en fonction de la charnière ou des flancs, l'évolution de la puissance pourrait très bien être liée à des causes sédimentaires (fréquence de stratification oblique dans les calcaires de l'Hauterivien supérieur). Le rayon de courbure  $R$  décroît de façon linéaire de l'extérieur vers le cœur du pli. L'analyse des trois paramètres montre bien qu'au niveau de la couche considérée, on est en face d'un pli concentrique.

#### *Anticlinal III et synclinal II (fig. 3 B)*

Ici l'évolution de  $t$  et  $T$ , dans la couche  $M$ , diffère des charnières aux flancs;  $t$  est maximal au niveau des charnières, minimal au niveau des flancs, alors que  $T$  est maximal dans les flancs et pratiquement minimal au niveau des charnières. Les rayons de courbure  $R$  ne montrent pas une évolution linéaire; on note cependant une croissance de  $R$  vers le cœur du synclinal II.

### *Etude du raccourcissement latéral des plis*

Le raccourcissement a d'abord été établi en utilisant la méthode de DE SITTER (1964) en mesurant la longueur réelle d'une strate et en la comparant à la longueur de sa projection sur une droite perpendiculaire au plan axial du pli. La différence de longueur est exprimée en pour-cent par rapport à la longueur réelle. Dans l'anticlinal I, au niveau de l'extrados  $M$  de la couche de référence, le raccourcissement est de 29%. On est encore dans le domaine du raccourcissement possible par plis concentriques, par glissement et par flexion.

Pour l'interlit  $M$  situé sous la couche de référence dans le synclinal II et l'anticlinal III, le raccourcissement est de 70%. DE SITTER (1964) a montré que théoriquement le raccourcissement par flexion ne peut pas dépasser 36%. Les caractéristiques au niveau des couches  $M$  dans les plis II, III ainsi que dans le pli IV montrent qu'il se superpose au plissement concentrique un aplatissement perpendiculairement au plan axial (fig. 4). Les plis évoluent en direction de plis de type «similaires» comme l'évoquent aussi les paramètres  $t$  et  $T$ . Les mesures faites sur les flancs des anticlinaux III et IV selon la méthode de RAMSAY (1967) donnent des aplatissements de l'ordre de 25 à 45%. La dispersion des points sur le diagramme (fig. 4) suggère la discontinuité de la déformation qui n'a pas dû se faire de façon homogène. Les observations à une échelle plus petite, au niveau de la microtectonique, tenteront de le prouver.

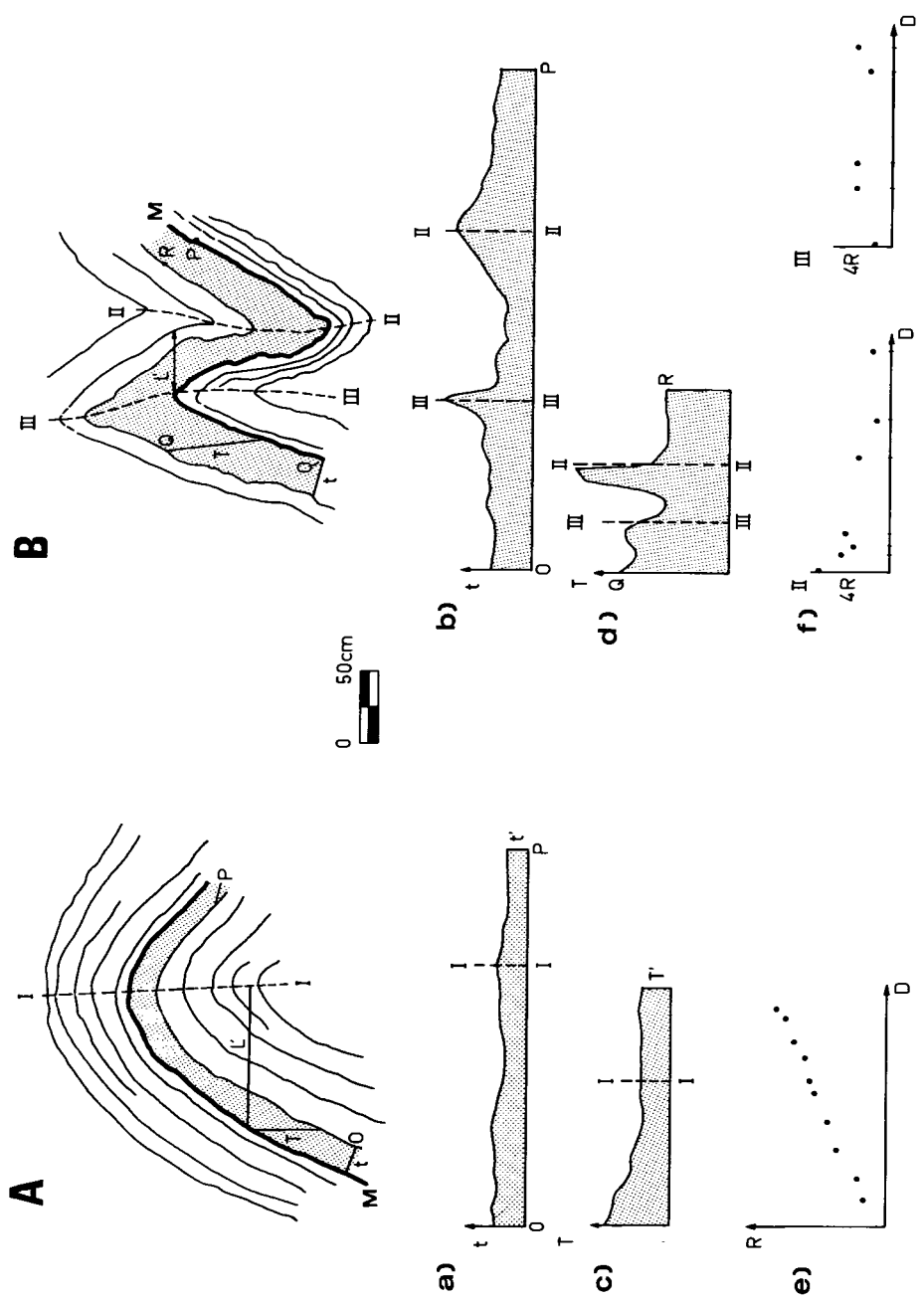


Fig. 3. Analyse géométrique des plis.

En A, plis de type concentrique de l'anticlinal I (fig. 2); en B, plis, synclinal II et anticlinal III (fig. 2), évoluant vers le type similaire. - a) et b) = épaisseur  $t$  (mesurée perpendiculairement à la stratification) de la couche située au toit de Q-P. - c) et d) = épaisseur  $T$  de la couche (mesurée parallèlement à la trace du plan axial). - e) et f) = évolution du rayon de courbure en fonction de la distance ( $D$ ) mesurée le long du plan axial.

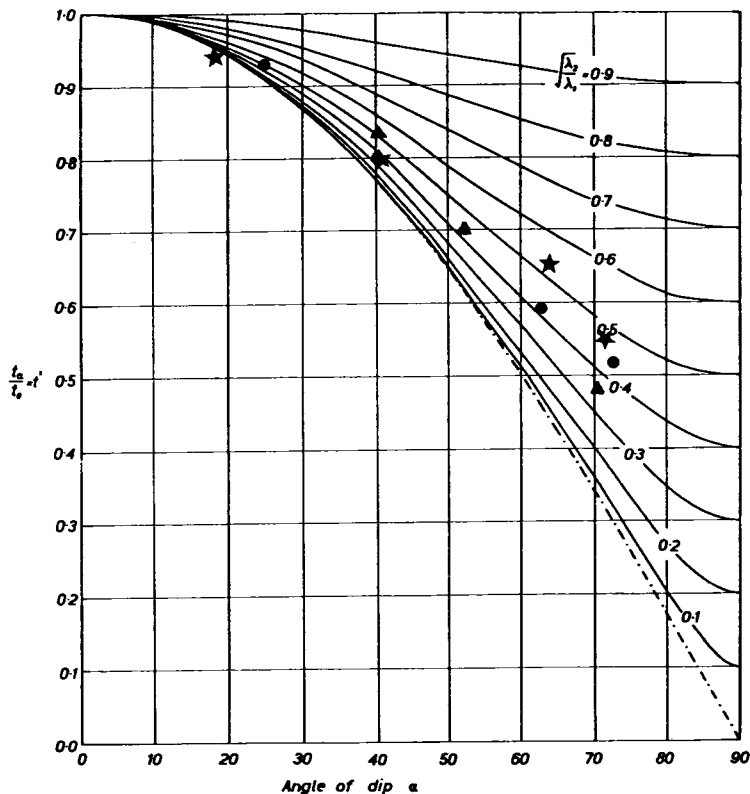


Fig. 4. Analyse de l'aplatissement (d'après RAMSAY 1967).

- ▲ = flanc gauche anticlinal IV
- = flanc gauche anticlinal III
- ★ = flanc droit anticlinal III

#### *Analyse à l'échelle décimétrique de l'échantillon*

Déjà lors d'une simple approche de l'affleurement, puis lors d'une analyse en détail des strates, force a été de constater que ces dernières sont découpées par de nombreux plans de discontinuité. Pour confirmer cette observation, une série d'échantillons a été prélevée dans des endroits jugés opportuns et représentatifs (échantillons *a*, *b*, *c*, etc., fig. 7 et 8).

Le polissage de surfaces perpendiculaires à l'axe des plis a fait ressortir clairement deux types de discontinuités qui délimitent de petits volumes irréguliers: a) les joints stylolithiques, b) les veines de calcite.

Pour saisir les relations entre ces éléments et pour parvenir à apprécier leur influence dans la formation des plis, on va procéder de la manière suivante: a) examen en lames minces de la roche, b) des joints, c) allures et positions des joints d'extension et de dissolution.

### *Absence de déformation interne*

Afin de tester la présence de déformation interne dans les calcaires, une suite de lames minces a été préparée. Dans notre analyse nous avons veillé à disposer de lames provenant des charnières, des flancs des plis, de les faire tailler avec des orientations diverses, et de les comparer avec d'autres ne provenant pas de la zone déformée. Il ne nous a jamais été possible de mettre en évidence des différences qui auraient pu être mises en relation avec la tectonique. Il faut insister tout particulièrement sur le fait que la sphéricité des ooïdes reste toujours et partout comparable et que dans ces éléments on ne décèle aucun signe de déformation par fluage. De plus, le ciment microsparitique reste lui aussi semblable à lui-même, quelle que soit la position des prélèvements; on ne reconnaît jamais de calcites maclées, pas plus que dans les macrocristaux provenant des débris d'échinodermes (différence avec les veines, cf. p. 558).

Il apparaît donc qu'au niveau de notre investigation, il n'a pas été possible de mettre en évidence une déformation interne à l'intérieur des volumes délimités par les divers joints. Il aurait peut-être été utile de confirmer cette proposition, surtout au niveau de l'examen du ciment sparitique, par des observations au microscope électronique. Ce travail reste à faire.

### *Veines de calcite*

Le caractère discontinu de la déformation se lit aisément sur les surfaces polies et dans les dessins qui furent faits à partir de ce matériel préparé. Les zones de rup-

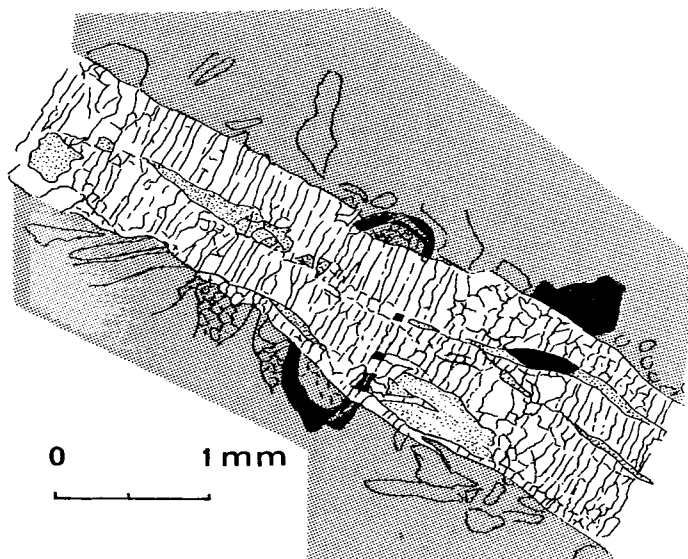


Fig. 5. Veine de calcite à cristaux de calcite prismatique traversant des calcaires (surface grisée). Dessin à partir d'une lame mince coupée dans la charnière de l'anticlinal I (fig. 7b). Orientation des prismes de calcite perpendiculaire aux bords de la veine. Des fragments de roches arrachés aux parois sont préservés à l'intérieur de la veine (surface grisée). La structure en étirement (boudinage) est illustrée par le sectionnement d'une coquille de gastéropode (centre de la figure).

tures sont soulignées par des veines de calcites blanches qui se détachent sur le fond jaune de la roche. Il est possible d'en distinguer deux types:

- L'un possède des veines assez larges avec un remplissage de calcites hétérogènes «blocky spar» le plus souvent translucides, mais parfois teintées par des produits oxydés jaunâtres. Il n'est pas rare d'observer des remplissages qui ne sont encore que partiels. On est en présence d'anciennes fissures ouvertes qui ont servi à l'écoulement des eaux et qui se sont lentement colmatées par cristallisation de calcite.
- Le second type comporte en général des fissures plus étroites. Son remplissage est toujours parfait; il est formé de calcites, parfois maclées, en agrégats prismatiques ou fibreux à allongement perpendiculaire parfois oblique aux parois (fig. 5). Certains cristaux présentent une continuité d'une paroi à l'autre. L'ouverture de ces veines a été lente et compensée par une croissance synchrone des calcites de remplissage (MISIK 1971, DURNAY & RAMSAY 1973). Lorsqu'il y a rotation relative d'une des parois par rapport à l'autre, les cristaux allongés soulignent ce type d'ouverture par les traces arquées de leurs contours (fig. 6).

Toutes ces veines qui utilisent des discontinuités préexistantes ou en créent de nouvelles, attestent des phénomènes d'extension. Leur disposition dans le pli permet

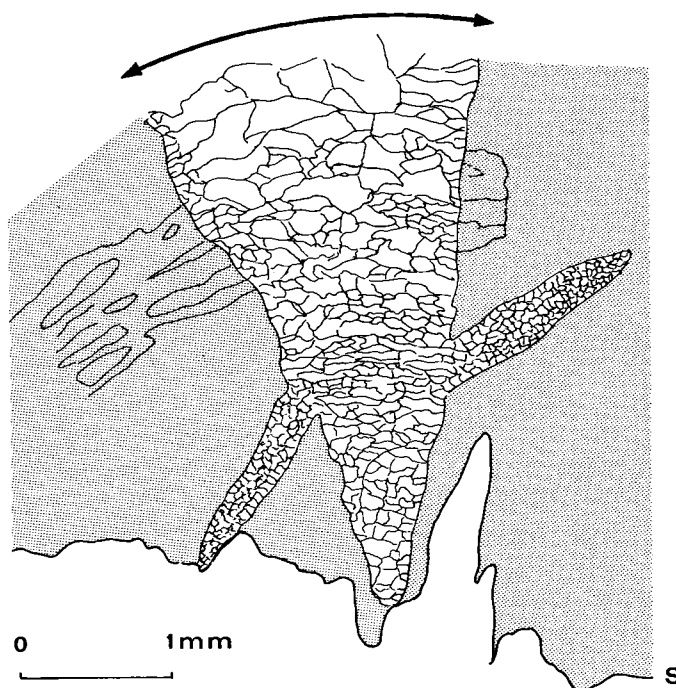


Fig. 6. Veine de calcite en forme de V dans des calcaires biodétritiques (surface grisée). La forme allongée des cristaux de calcite et leur arrangement évoquent la rotation des parois l'une par rapport à l'autre. Un fragment de bryzoaire, une ancienne veine (évtl. stylolithe) confirme la rotation. La veine en V butte à sa base sur un joint stylolithique (S).



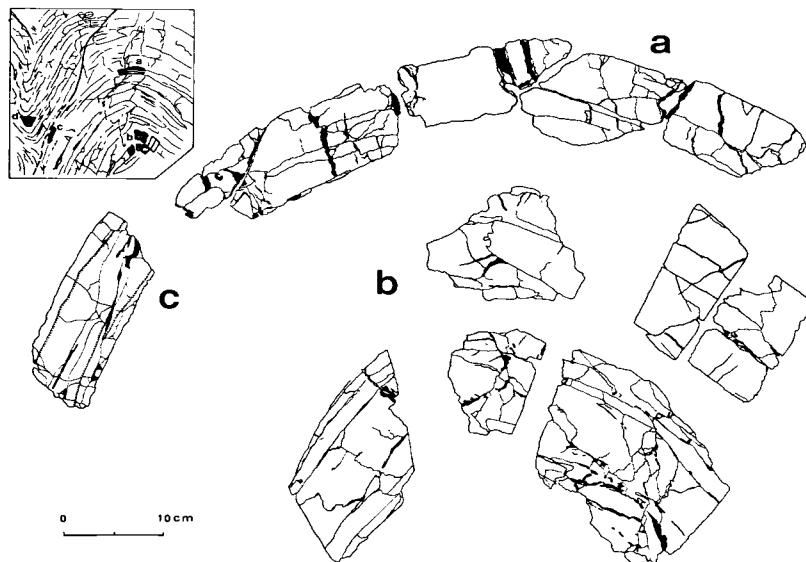


Fig. 7. Pli concentrique. Analyse de surfaces polies d'échantillons pris dans l'anticlinal I. Les veines d'extension remplies de calcite sont soulignées en noir. Les joints et surfaces de dissolution sont indiqués par un simple trait. La position des échantillons analysés est indiquée dans le cadre en haut et à gauche de la figure.

de situer l'orientation locale de la contrainte minimale. Dans les plis à grand rayon de courbure (plis de type concentrique), là où à l'affleurement la continuité des bancs ne semble pas faire de doute, les surfaces polies (fig. 7a) laissent apparaître une suite de joints radiaux, perpendiculaires à la stratification.

Le remplissage partiel et le type de cristallisation attestent d'anciennes ouvertures béantes, souvent assez larges, surtout à l'extrados des bancs. La forme en biseau de ces ouvertures n'est pas aussi parfaite que le voudrait le modèle théorique. Plusieurs d'entre elles traversent tout un banc et ont encore une épaisseur appréciable à la base de celui-ci. Sur la figure 7a l'extension relative mesurée par la largeur des veines comparée au développement de la section est de 7, 4½ et 2% respectivement au sommet, au milieu et à la base du banc supérieur de la figure.

Dans la zone de passage entre les plis concentriques et les plis de type similaire (fig. 7b) des joints d'extension suivent souvent les surfaces de stratification. Ils sont accompagnés de veines en biseaux.

Dans le cœur des plis, les joints d'extension sont très développés; leur orientation subhorizontale, perpendiculaire aux surfaces axiales, est particulièrement typique. Dans les flancs des plis similaires, là où les pendages sont proches de la verticale, ils s'orientent perpendiculairement à la stratification, ils peuvent y être très fréquents (fig. 8c) et particulièrement larges.

#### *Joints stylolithiques*

Dans les plis étudiés, deux types de joints stylolithiques peuvent être mis en évidence. Ce sont:

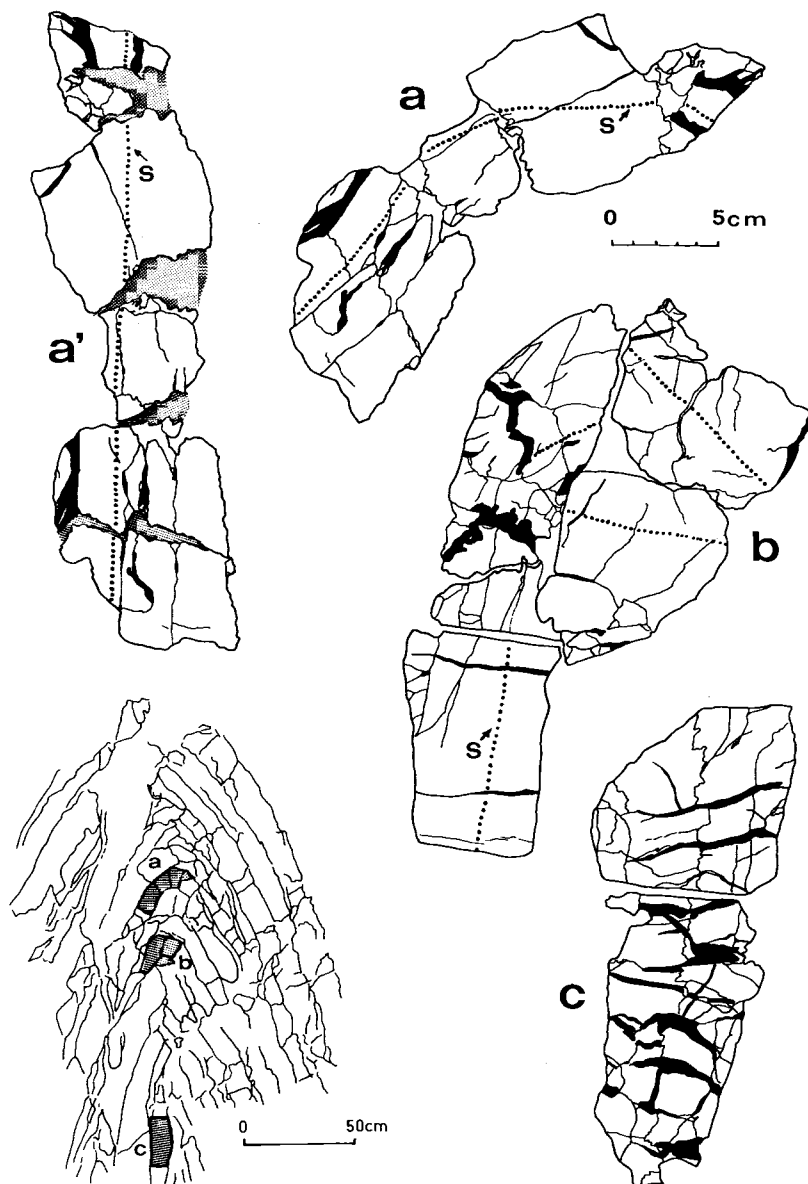


Fig. 8. Anticline IV, étude par surface polie.

En bas à gauche: position des échantillons analysés. A droite *a*, *b*, *c*: analyse des surfaces polies, avec en noir les veines d'extension remplies de calcite. Dans les échantillons *a* et *b* on a souligné par une ligne pointillée la trace de la stratification *s*. Ces lignes soulignent que le plissement se produit par rotation de fragments rigides (*a* et *b*).

En *a'* l'échantillon *a* a été redressé, ce qui permet d'apprécier les surfaces dissoutes (surfaces grisées).

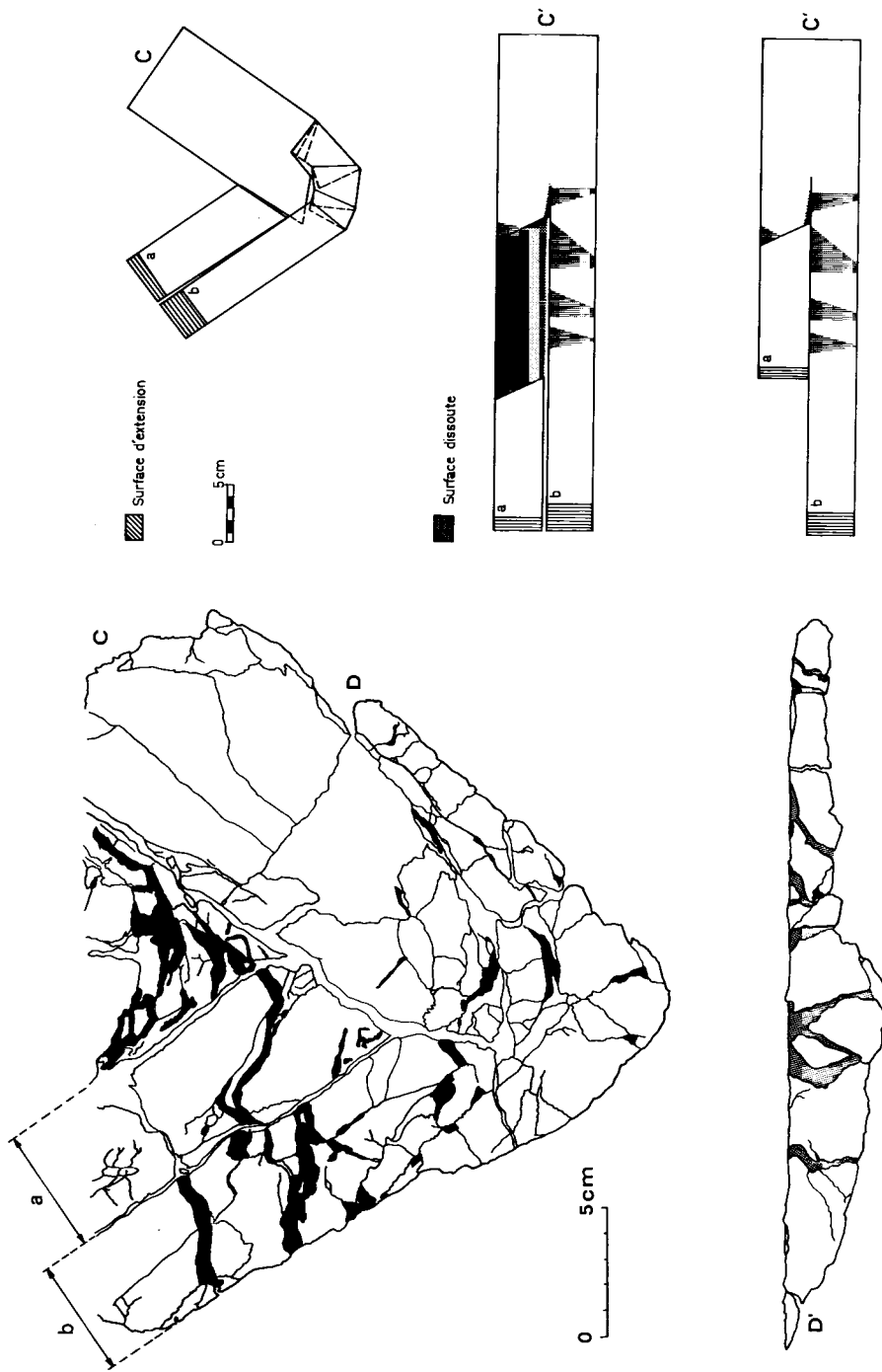


Fig. 9. Synclinal II, étude de surface polie.

La position de l'échantillon analysé est indiquée dans le cadre en haut et à gauche de la figure 7, en *d*. La couche *C*, sous l'effet du plissement, se divise en deux sous-couches *a* et *b*. Le fond du synclinal est marqué par une couche *D* qui a été dépliée en *D'* pour souligner l'importance des surfaces dissoutes (surfaces grisées).

Sur la droite, modèle de plissement pour situer l'importance des surfaces dissoutes de la couche *C* (cf. texte).



Fig. 10. Synclinal II, photo de surface polie en *d* (fig. 7; cf. également fig. 9).

- a) Des joints qui se trouvent être parallèles au plan de couche avec des pics perpendiculaires. Leur origine diagénétique précoce est probable pour la plupart. Durant le plissement ils représentent des zones de faiblesse qui permettent des ouvertures; dans d'autres cas ils peuvent à nouveau fonctionner comme stylolithes sous l'effet des contraintes tectoniques.
- b) Les joints stylolithiques les plus fréquents ont une origine tectonique que prouve leur orientation perpendiculaire, ou parfois oblique par rapport au plan de couche. La nature post-diagénétique de ce type de joints a été en outre établie par BLAKE & ROY 1949 (voir également ARTHAUD & MATTAUER 1969).

Dans notre étude, ainsi que VIDAL & SOULAS (1978) l'ont montré, deux sous-groupes de joints stylolithiques peuvent être mis en évidence:

- ceux qui sont sur des plans perpendiculaires aux strates,
- ceux qui sont sur des plans parallèles au plan axial, donc obliques aux strates, voire perpendiculaires.

Dans le domaine où les plis sont de type concentrique, les plans à pics stylolithiques perpendiculaires au plan de stratification sont particulièrement bien développés. Ils dessinent un éventail que VIDAL & SOULAS interprètent comme une preuve d'une formation précoce. Sans rejeter cette proposition, constatons que les joints stylolithiques peuvent s'ouvrir à l'extrados de la couche, alors que dans l'intrados du banc ils jouent en compression et évoluent en tant que stylolithes (fig. 11). Dans la zone à grand rayon de courbure des plis concentriques, les joints radiaux d'extension ont pratiquement toujours utilisé d'anciens joints stylolithiques pour se développer.

L'interaction joints stylolithiques-joints d'extension est importante. Ainsi aux veines d'extension en biseau, dues au glissement relatif sous-couche sur sous-couche, sont associés des joints de dissolution (fig. 12). Il y a cohérence entre l'orientation de

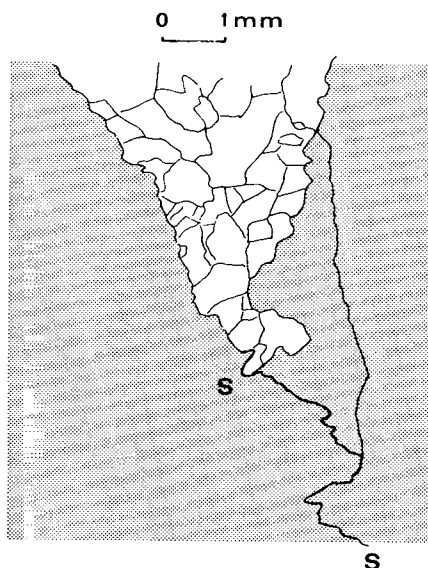


Fig. 11. Veine en extension en forme de  $V$  à remplissage de gros cristaux de calcite. La veine semble s'être développée sur un ancien joint stylolithique ( $S$ ).

certains pics des joints stylolithiques et l'orientation de la croissance des cristaux de calcite dans les veines voisines.

Lorsque le raccourcissement dépasse 60%, les plis évoluent vers des formes qui se rapprochent des plis similaires; dans ces cas-là de nouveaux plans stylolithiques se développent. Ils se caractérisent par des pics perpendiculaires au plan axial. Leur importance et leur fréquence ne sont cependant pas assez marquées pour qu'ils puissent être considérés comme «space cleavage» selon ALVAREZ et al. (1976). Finalement lorsque les pendages des strates deviennent très redressés, les joints stylolithiques stratigraphiques peuvent rejouer.

Ainsi, le passage du domaine des plis concentriques au domaine des plis similaires se fait par l'augmentation progressive de pics subhorizontaux perpendiculaires au plan axial qui remplace l'effet d'articulation que permettaient les plans stylolithiques perpendiculaires au plan de stratification.

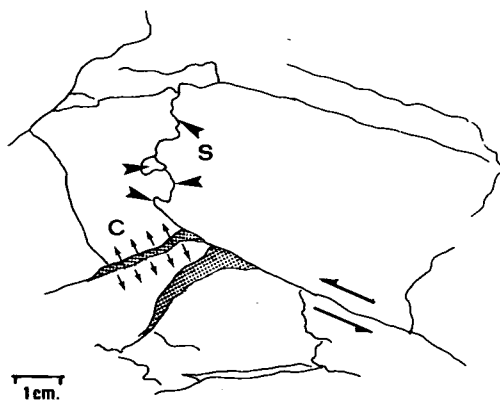


Fig. 12. Relation géométrique entre veines d'extension à cristaux de calcite prismatique ( $C$ ), pics stylolithiques ( $S$ ) et glissement de couches sur couches (anticlinal I, position  $b$ , fig. 7).

### *Type de plissement*

On a pu montrer que lors du plissement des calcaires de l'Hauterivien, la déformation interne, au niveau de la matrice, comme au niveau des éléments oolithiques et biodétritiques, n'a pas pu jouer un rôle important. Mises sous contraintes, les strates, qui ne pouvaient se ployer, se sont cassées. Elles ont aussi transformé leur structure feuilletée en un ensemble de plaques indépendantes, qui possédaient encore des dimensions latérales importantes par rapport à leur épaisseur. Lors de la déformation progressive, dans les zones de contact entre les éléments indépendants, des surpressions permettent, par dissolutions locales, la formation de stylolithes; les plaques encore trop rigides sont divisées par fractures successives en fragments qui deviennent de plus en plus équidimensionnels. Les ruptures se font par cisaillement ainsi que par traction. Dans ce dernier cas, des vides se forment; ceux-ci, comme ceux créés lors de rotations relatives des blocs, sont remplis de calcite. Sous l'effet de la dissolution, la géométrie extérieure des éléments évolue et s'adapte aux espaces disponibles.

Ainsi, au cours de la déformation, les cassures transforment le domaine relativement continu des strates en un domaine discontinu de plaques, de fragments, de blocs; il devient alors possible d'en assurer l'articulation par rotation des éléments unitaires et d'obtenir ainsi l'illusion d'une flexion. En fait, chaque élément reste rigide, les plans de stratification ne sont pas ployés, leur trace forme une suite de lignes qui sont brisées, lorsqu'on passe d'un élément à un autre; la figure 8 illustre particulièrement bien le phénomène de l'articulation discontinue et par rotation. Celle-ci s'accompagne d'une importante remobilisation de calcite dissoute au niveau des joints stylolithiques, redéposée dans les zones d'extension. Sans chercher à établir un bilan global de ce phénomène dans lequel existe une zone de départ et une zone d'accumulation, il a paru intéressant d'apprécier, par des considérations sur les surfaces, les volumes touchés par ce phénomène dans quelques situations particulières de charnières et de flancs d'anticlinal.

### *Volumes dissous dans les charnières et redéposés dans les flancs*

L'appréciation des volumes dissous a été tentée sur des surfaces polies. Les couches furent dépliées en utilisant les joints stylolithiques comme zone d'articulation. Tous les éléments furent alignés en fonction de lignes de référence qui devaient être horizontales au moment du dépôt (plan de couche, limite de changement de faciès). Les dissolutions obtenues par cette méthode sont des valeurs minimales car on doit admettre que l'articulation réelle a pu se faire à partir d'un point charnière qui a lui-même disparu par dissolution.

Dans la figure 8a' l'estimation des volumes de calcite précipitée (surface grisée) se situe au voisinage de 8 à 10% de l'élément considéré. Dans l'élément externe de charnière synclinale dépliée de la figure 9D et D', on arrive à une estimation de 15% de dissolution (on remarquera ici qu'il n'est pas aisé de donner une signification précise à cet élément de strate: influence tectonique ?, stratification oblique ?). Pour apprécier l'importance de la dissolution à l'intérieur de la charnière synclinale

(fig. 9), où il est possible d'introduire, sur le côté gauche de l'échantillon, une division de la couche *C* en deux sous-couches *a* et *b*, trois schémas simplificateurs sont présentés. En dépliant la figure schématique et en empêchant tout glissement de *a* par rapport à *b*, on doit introduire une large zone de dissolution au niveau de *a* qui s'ajoute à celle que demande la courbure au niveau de *b*. La totalité de la partie grisée représente 24% au total. Théoriquement, il est possible de réduire la surface en opérant une translation senestre de *a* par rapport à *b*. La dissolution est alors réduite à 8,5%. Elle pourrait s'être située au voisinage de 15% dans le cas réel (dissolution de coin accompagnée d'une translation modeste).

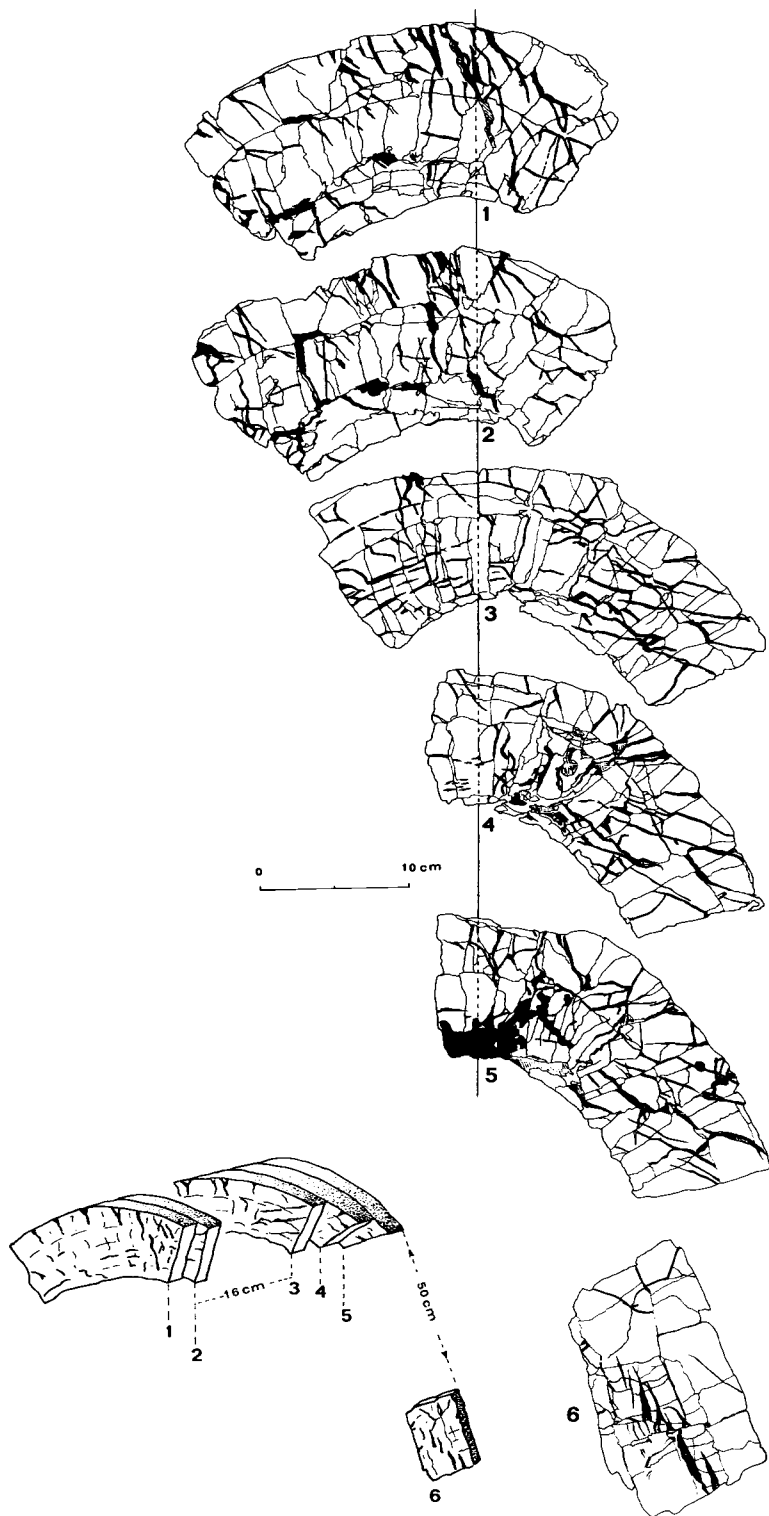
Dans les analyses des volumes déposés dans les flancs étirés, figures 8 et 9, l'extension est respectivement de 15 et 25%. Ces exemples montrent que dissolution et recristallisation dans les fentes de tensions sont volumétriquement des phénomènes importants; il se peut que *globalement ils se compensent avec probablement une légère tendance à l'exportation.*

### *Plis d'entraînement dans les calcaires argoviens*

Les résultats obtenus dans les calcaires de l'Hauterivien nous ont engagé à examiner si le mécanisme que nous envisagions se rencontrait également dans des formations de nature pétrographique différente du Jura, et cela tout particulièrement lorsque des déformations de même échelle s'étaient faites sous des surcharges plus importantes. Notre choix s'est porté sur un pli dans des calcaires micritiques en bancs de 10 à 40 cm de puissance de la base de l'Argovien, qui dans la région du «Vorpet» (coord. 544.975/212.780) sont plissés par des phénomènes d'entraînement en bordure d'une faille d'extension régionale. La charge totale lors de la déformation paraît avoir été légèrement inférieure au kilomètre.

Le pli considéré a été scié au niveau de sa charnière, suivant une suite de plans parallèles entre eux et perpendiculaires à l'axe du pli mais non équidistants (fig. 13). Ces sections furent polies et ont servi à l'établissement des dessins de la planche (fig. 13). En examinant le pli de façon globale, on a l'impression d'être en présence d'une voûte particulièrement régulière. Un examen plus attentif révèle cependant que la surface de couche présente un aspect quelque peu bosselé qui n'est pas lié à des actions d'érosion différentielles.

L'examen attentif des surfaces polies fait apparaître clairement le caractère discontinu de la déformation. La voûte, dont la courbure n'est pas parfaitement régulière, est formée d'une mosaïque d'éléments indépendants mais actuellement solidement soudés. Ceux-ci ont été individualisés dans la strate calcaire au cours du plissement par des fentes d'extension, par des plans de dissolution. De nombreuses surfaces de discontinuités se sont développées en suivant plus ou moins parfaitement d'anciennes surfaces de stratification alors que les joints de dissolution et d'extension s'orientaient principalement perpendiculairement. L'ensemble de ce découpage a permis l'individualisation d'une multitude d'éléments indépendants qui ont pu, à la faveur de faibles rotations, translations et dissolutions, s'adapter aux exigences géométriques de la voûte. On remarquera que les joints d'extension radiaux présentent des biseaux plus ouverts vers l'extrados des bancs; certains d'entre eux se pincent et disparaissent déjà au niveau des sous-bancs, d'autres se





développent à partir de ce niveau et en assurent en quelque sorte le relais. Des joints plus ou moins perpendiculaires au plan axial, mais légèrement basculés dans le sens du pendage, illustrent l'extension dans cette direction qui apparaît ici déjà dans des plis où la courbure reste encore faible.

En direction axiale, les plans des veines de calcite, d'allure radiée, suivent le plus souvent une direction voisine de celle de l'axe du pli. Un autre groupe, moins important, fait un angle de 30 à 40° avec cette direction. Toutes ces veines ont, semble-t-il, des extensions limitées. D'une coupe à l'autre, leur nombre, leur position et leur épaisseur varient, ce qui souligne encore une fois la discontinuité et l'hétérogénéité de la déformation. Sur les plans de couches on observe çà et là des stries qui soulignent les glissements couche sur couche; leur orientation se situe entre une position perpendiculaire et une obliquité de 30 à 40° par rapport à l'axe du pli. Dans ce dernier cas, stries et pics stylolithiques associés, représentent des mouvements liés à des cisaillements dont les fentes d'extension à ouvertures perpendiculaires sont les parfaits corollaires. On retrouve ici les associations de déformations rencontrées dans le Jura à plus grande échelle (KIRALY & MEIA 1967).

### 3. Conclusion

Ainsi à l'échelle de l'affleurement, les plis étudiés, tant ceux de «Dessus la Prise» (Hauterivien), que ceux du «Vorpet» (Argovien) présentent une géométrie qui évoque la plasticité du matériel. Cette impression est trompeuse puisque l'étude de détail montre que la déformation est discontinue et se fait par cassures, dissolution et rotation d'éléments qui n'ont pas subi de déformation interne. La déformation pourrait être décrite par son seul aspect cataclastique mais les déformations à petite échelle s'intègrent dans des volumes étendus pour donner une image globale, semblable par ses formes, à celles rencontrées dans les déformations produites à un régime structural plus profond; la déformation sera ainsi qualifiée de cataclastique plastique (GRAMBERG 1965).

Nos observations nous conduisent à envisager l'évolution suivante pour les plis (cf. fig. 14):

(A) Dès avant le plissement on doit admettre qu'il existe déjà des discontinuités transversales aux couches (PRICE 1974) mais leur nombre va augmenter de façon substantielle dès que va apparaître une contrainte horizontale importante. Sous l'effet de celle-ci naissent les cisaillements à plans subverticaux orientés à moins de 45° par rapport à la contrainte principale. Ils sont accompagnés par d'autres manifestations cisailantes qui sectionnent les couches en biseaux. Ce dernier phénomène va servir d'amorce au charriage aux plis précoces (LAUBSCHER 1977). Ainsi que CHOUKROUNE et d'autres l'ont montré dans d'autres régions, toutes ces manifestations cassantes s'accompagnent de dissolutions qui forment des stylolithes

Fig. 13. Plis dans calcaire micritique de la base de l'Argovien, région «Vorpet» (coord. 544.975/212.780). Le pli d'entraînement a été scié en tranches de 2 à 3 cm d'épaisseur. Un certain nombre de surfaces furent polies et dessinées. En noir: veines à remplissage de calcite. Parties hachurées: zone d'extension vide.

à pics orientés parallèlement à la contrainte. - (B) Dès que les premières courbures apparaissent dans les bancs, il se développe un réseau de fissures subverticales parallèles à la direction axiale. Ces plans peuvent être le siège de phénomènes de dissolutions et d'ouverture; les premiers se manifesteront principalement, mais pas exclusivement, vers la base des bancs, alors que les fissures ouvertes en caractérisent-

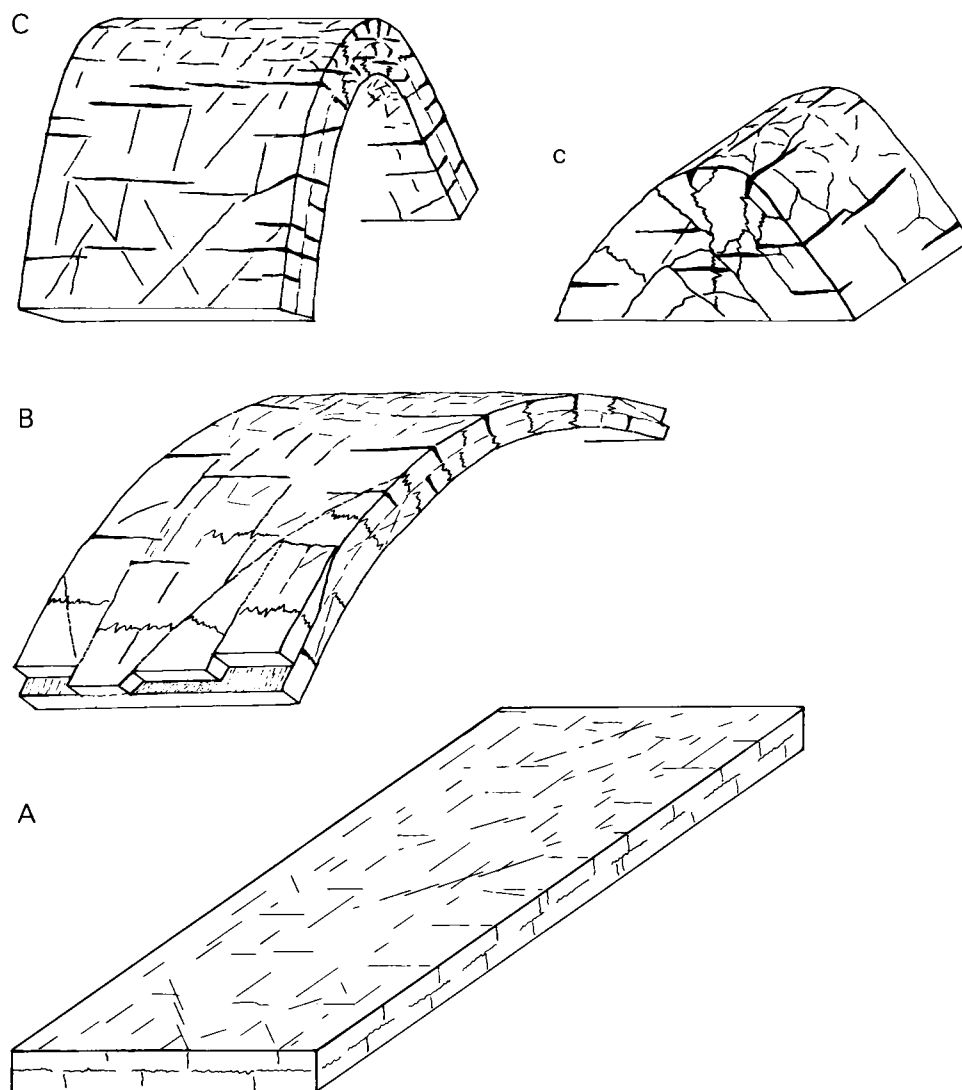


Fig. 14. Modèle d'évolution des plis métriques et décimétriques dans les roches calcaires sous faible couverture (cf. texte «Conclusion»).

- A. Avant le plissement, sous l'effet d'une contrainte horizontale importante.
- B. Dès les premières courbures jusqu'à un raccourcissement de 30%.
- C. Raccourcissement de 60% ou plus.

ront surtout l'extérieur. Cet ensemble de déformations qu'accompagnent des mouvements couche sur couche en grand cercle, ainsi que parallèlement aux directions de cisaillement, assurent le gros de l'articulation des plis tant que le raccourcissement ne dépasse pas 30%. - (C) Au-delà, d'autres mécanismes qui se manifestent parfois de façon précoce, prennent le relais pour permettre une évolution de la géométrie du pli en direction de formes similaires. A la faveur de nombreuses fissures ouvertes, subhorizontales, visibles dans la charnière et les flancs, une extension importante se fait parallèlement au plan axial. Elle est accompagnée de dissolution qui se manifestent principalement sur les joints stylolithiques stratiformes dès que les pendages des flancs dépassent 60°. L'appréciation des volumes dissous à ce niveau est délicate, puisque ces stylolithes se superposent à ceux qui ont pu se développer dans la phase de diagenèse précoce. D'une manière générale, le phénomène de dissolution par surpression est fondamental dans ce type de plissement. Il entraîne des transports de matière qui représentent souvent le 10%, voire le 20% des volumes originaux.

On sait qu'à haute  $T$  et  $P$ , la déformation dans les roches comme dans les métaux se fait principalement par les dislocations à l'intérieur de l'édifice cristallin. L'intégration de l'ensemble de ses déplacements donne à l'ensemble rocheux sa grande mobilité. A température et pression plus modérées, la déformation des calcaires implique surtout des dissolutions et recristallisations qui se placent à la limite des grains et qui se font par l'intermédiaire des films intergranulaires et de la porosité d'interstice. A moindre profondeur, le mécanisme de déformation intime au niveau granulaire va graduellement perdre de son importance et se trouver relayé par la déformation par dissolution sur des plans privilégiés (GROSHONG 1975). Très près de la surface, ainsi que notre étude le montre, la déformation intime cessera de jouer un rôle important et tout se passera au niveau des joints et fissures. Ces dernières voient leur nombre et leur importance augmenter lorsque le seuil de plasticité du matériel est dépassé et qu'il se produit des ruptures qui pourraient être induites par surpression. Les fissures ne vont pas seulement permettre la rotation et les translations des blocs unitaires, elles faciliteront le drainage et par là le transport et la redistribution de la matière qui accompagne toute déformation à ce niveau.

### Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier L. Király pour des discussions stimulantes, G. Magranville, préparateur à l'Institut de Géologie de Neuchâtel, pour l'aide apportée dans la récolte des échantillons et pour leur préparation en laboratoire. Une première version de ce travail rédigée par l'un d'entre nous (A.D.) a reçu le prix Perrier de la Faculté des Sciences de l'Université de Neuchâtel.

### BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ, W., ENGELDER, T., & LOWRIE, W. (1976): *The role of calcium carbonate dissolution in deformation of Scaglia Rossa limestone*. - *Geology* 4, 698-701.
- ARTHAUD, F., & MATTAUER, M. (1969): *Exemples de stylolithes d'origine tectonique dans le Languedoc, leurs relations avec la tectonique cassante*. - *Bull. Soc. géol. France* (7), 11, 738-744.
- BLAKE, D. B., & ROY, C. J. (1969): *Usual stylolithes*. - *Amer. J. Sci.* 247, 779-790.
- CHOUKROUNE, P. (1969): *Un exemple d'analyse microtectonique d'une série calcaire affectée de plis isopaques («concentriques»)*. - *Tectonophysics* 7, 57-70.

- DURNAY, D. W., & RAMSAY, G. (1973): *Incremental strains measured by syntectonic crystal growths*. In: JONG, K. A. DE, & SCHOLTEN, R. (Eds.): *Gravity and Tectonics* (p. 67-96). - John Wiley, New York.
- GRAMBERG, J. (1965): *Axial cleavage fracturing, a significant process in mining and geology*. - Eng. Geol. 1, 31-72.
- GROSHONG, R. H. (1975): *Strain, fractures and pressure solution in natural single-layer folds*. - Bull. geol. Soc. Amer. 86, 1363-1376.
- KIRÁLY, L., & MEIA, J. (1967): *Observations tectoniques dans une carrière de Chaumont (Jura neuchâtois, Suisse)*. - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 90, 277-290.
- LAUBSCHER, H. P. (1977): *Fold development in the Jura*. - Tectonophysics 37, 337-362.
- (1979): *Elements of Jura kinematics and dynamics*. - Eclogae geol. Helv. 72/2, 467-483.
- MISIK, M. (1971): *Observations concerning calcite veinlets in carbonate rocks*. - J. sediment. Petrol. 41, 450-460.
- PRICE, N. (1974): *The development of stress systems and fracture patterns in undeformed sediments*. In: *Advances in Rock Mechanics* (p. 487-498). - Proc. 3<sup>rd</sup> int. Conf. Soc. Rock Mech., Denver (Color.) 1A.
- RAMSAY, J. G. (1967): *Folding and fracturing of rocks* (p. 413). - McGraw-Hill, New York.
- RICKENBACH, E. (1925): *Description géologique du Val de Travers entre Fleurier et Travers, du Cirque de St-Sulpice et de la vallée de la Brévine*. - Bull. Soc. neuchât. Sci. nat. 50, 1-76.
- SCHARDT, H. (1905): *Observations géologiques sur les environs de Couvet*. - Mém. géol. 23/5.
- SITTER, L. U. DE (1964): *Structural Geology* (2<sup>nd</sup> Ed.) (p. 277). - McGraw-Hill, New York.
- VIDAL, J. L., & SOULAS, J. C. (1978): *Rôle et signification de stylolites dans un processus de plissement*. - C.R. Acad. Sci. (Paris) (D), 286, 667-670.