

# Déformation interne dans les Préalpes médianes (Suisse)

Autor(en): **Mosar, Jon**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **82 (1989)**

Heft 3

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-166402>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Déformation interne dans les Préalpes médianes (Suisse)

Par Jon Mosar<sup>1)</sup>

Mots clefs: Préalpes médianes, déformation interne, dissolution – cristallisation, maclage de la calcite, déformation précoce, métamorphisme transporté, plissement, cisaillement.

Key words: Préalpes médianes, internal deformation, pressure solution, calcite twinning, early deformation, transported metamorphism, folding, shearing.

## ABSTRACT

The Swiss “Préalpes romandes” are a stack of several nappes of Penninic and Ligurian origin, located on the NW border of the Helvetic nappes. The most important of these are the “Préalpes médianes”, which are the subject of this study and are classically divided into the frontal “Préalpes médianes plastiques” dominated by large fault-propagation folds and the interior “Préalpes médianes rigides” dominated by large fault-bend folds.

The internal deformation of limestones from the “Préalpes médianes” has been measured using the distortion of pellets as well as twinning of sparitic calcite. The strain intensity in the frontal “Préalpes médianes plastiques” is very low and dominated by transgranular deformation mechanisms, mainly pressure solution, with weak development of calcite twins. This deformation is an “early” shortening parallel to bedding emphasized by the development of tectonic stylolites and an early rock cleavage. The strain increases going into the more internal “Préalpes médianes rigides” where intragranular deformation mechanisms prevail, such as twinning (numerous large, curved and twinned twins) and dynamic recrystallisation. The most intense strain is associated with large scale shearing due to thrusting on the basal decollements of the “Préalpes médianes” nappe and of the overlying Brèche nappe. The calculated finite extension is parallel to the general NW transport direction in the vicinity of the thrust planes. Elsewhere in the nappe the extension dips at a high angle to the thrustplanes.

The metamorphism of the “Préalpes médianes”, which is transported relative to the underlying nappes, is closely associated with the deformation. It is studied by means of illite crystallinity and increases from diagenesis in the “Préalpes médianes plastiques” to epizone in the “Préalpes médianes rigides”, probably reaching 350 °C. Both, the metamorphism and the internal deformation have taken place before the “Préalpes médianes” were emplaced onto the Helvetic nappes.

## RÉSUMÉ

Les Préalpes romandes de Suisse sont formées par une pile de nappes de chevauchement d'origines penniques et ligures, actuellement situées sur le bord NW des nappes Helvétiques. La plus importante de ces nappes forme les Préalpes médianes, qui constituent le sujet de cet article. Classiquement on les subdivise en Préalpes médianes plastiques dans la partie frontale, dominées par des plis failles, et en Préalpes médianes rigides à l'arrière de la nappe, dominées elles par des écailles tectoniques avec rampes et paliers.

La déformation interne a été étudiée sur des roches calcaires des Préalpes médianes en utilisant la distorsion de pellets et le maclage de grains de calcite sparitique. A l'avant de la nappe (Préalpes médianes plastiques), où la déformation est faible, ce sont surtout les mécanismes de déformation transgranulaires, principalement la dissolu-

---

<sup>1)</sup> Institut de Géologie, Université de Neuchâtel, 11 rue Emile Argand, CH-2000 Neuchâtel, Switzerland.  
Adresse actuelle: Princeton University, Dept. of Geophysical & Geological Sciences, Guyot Hall, Princeton, New Jersey 08544, U.S.A.

tion – cristallisation, qui prédominent. Cette déformation «précoce» est soulignée par la formation de joints stylolithiques tectoniques et d'un clivage schisteux précoce. L'intensité de déformation augmente lorsqu'on va vers l'arrière, dans les Préalpes médianes rigides, où prédominent les mécanismes de déformation intragranulaires tels que le maclage de la calcite (nombreuses macles larges, courbes et maclées) et la recristallisation dynamique. La déformation est ici associée à un cisaillement à grande échelle dû aux mouvements chevauchants sur les décollements basaux de la nappe des Préalpes médianes et de la nappe de la Brèche sus-jacente. L'extension finie calculée est parallèle à la direction générale de transport vers le NW à proximité des plans de chevauchements. Ailleurs dans la nappe l'extension plonge avec un fort angle par rapport aux plans de chevauchements.

Le métamorphisme des Préalpes médianes, qui est transporté par rapport aux unités sous-jacentes, est étroitement associé à la déformation interne. Son étude, par le biais de la cristallinité de l'illite, révèle une intensité métamorphique augmentant depuis la diagenèse dans les Préalpes médianes plastiques jusqu'à l'épizone dans les Préalpes médianes rigides, atteignant probablement 350 °C. Le métamorphisme et la déformation interne se sont faits avant l'arrivée des Préalpes médianes sur les nappes Helvétiques.

## 1. Introduction

Le présent article constitue en fait la seconde partie de ma thèse de doctorat concernant les structures, la déformation et le métamorphisme dans les Préalpes médianes romandes (Suisse) (MOSAR 1988a). La première partie traite du métamorphisme transporté (MOSAR 1988b) et la troisième concerne la géologie structurale (MOSAR en prep.).

Les Préalpes Romandes de Suisse sont formées par un ensemble de nappes allochtones d'origine paléogéographique pennique et ligur. Cet ensemble, actuellement situé au NW des nappes Helvétiques (fig. 1), en position frontale du système alpin, se compose de plusieurs unités: A) la nappe Supérieure (ligur) dont font partie entre autres la nappe de la Simme et la nappe du Gurnigel; B) la nappe de la Brèche; C) la nappe des Préalpes médianes et D) la nappe du Niesen (fig. 1) (CARON 1972, 1973; TRÜMPY 1980). Ces unités reposent soit sur la Molasse subalpine ou autochtone, soit sur les nappes de l'Helvétique par l'intermédiaire d'un coussin d'Ultrahelvétique et d'un wildflysch à lentilles d'Ultrahelvétique, de gypses et cornieules.

Les Préalpes médianes, d'origine briançonnaise et subbriançonnaise, constituent l'ossature de l'édifice préalpin. Classiquement on les subdivise en *Médianes Plastiques* au NW, constituant la partie frontale, et en *Médianes Rigides* au SE (LUGEON & GAGNEBIN 1941), constituant la partie arrière de la nappe (fig. 1 et fig. 2). Ces deux ensembles sont séparés, dans les Préalpes médianes de l'W, par l'écaille des Gastlosen (fig. 1). Cette écaille n'affleure plus dans la partie E des Préalpes, mais pourrait être enfouie, en retrait, sous les Médianes Rigides de la région du Niederhorn-Turnen (fig. 2). Les Préalpes médianes sont formées de roches allant du Trias moyen jusqu'au Crétacé supérieur – Tertiaire, et de flyschs éocènes formant le sommet de la série. Ce sont essentiellement des calcaires et des marnes. Des niveaux épais de calcaires se rencontrent surtout au Trias, Lias et Malm, alors que le Dogger et le Crétacé – Tertiaire (Néocomien et Couches Rouges) sont composés d'alternances de marnes et calcaires (PLANCHEREL 1979; BAUD & SEPTFONTAINE 1980; TRÜMPY 1980). Dans les Médianes Plastiques, la série va du Trias supérieur jusqu'au Crétacé supérieur – Tertiaire, suivi des flyschs éocènes. Dans les Médianes Rigides la série débute avec le Trias moyen (BAUD 1972) suivi d'un Dogger très réduit et se termine par le Crétacé sup. – Tertiaire recouvert des flysch éocènes (fig. 2). Le Lias et le Crétacé inférieur (Néocomien) y sont absents.

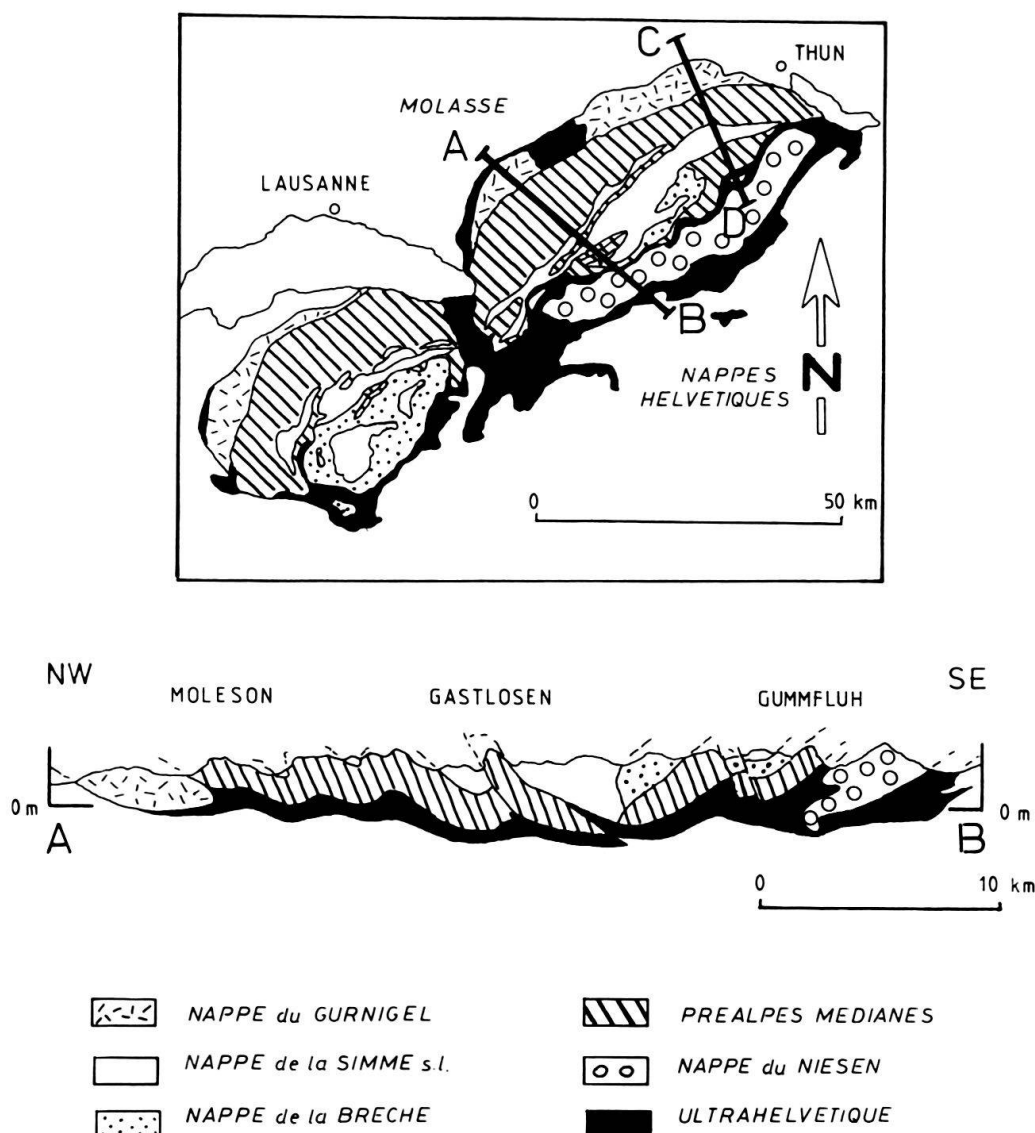


Fig. 1. Carte tectonique et coupe structurale simplifiées des Préalpes (modifiées d'après Caron, 1972). AB et CD désignent le tracé des coupes de la fig. 1 respectivement de la fig. 2.

Tectoniquement les Médiannes Plastiques sont caractérisées par une suite de plis à grande échelle disposés en échelon (SCHARDT 1884; JEANNET 1922; BIERI 1925; UMIKER 1952; NICOL 1956; PLANCHEREL & WEIDMANN 1972; PLANCHEREL 1976, 1979) (fig. 2). Ils sont accompagnés de plis métriques de second ordre dans les niveaux incompetentes des alternances de marnes et calcaires. La dispersion des plis, plongeant soit vers l'W à SW soit vers l'E à NE selon le secteur étudié, reflète à une autre échelle la structure en échelon des grands plis (fig. 2 stéréogrammes synthétiques). Dans les Médiannes Rigides on observe un ensemble d'écaillés tectoniques, localement imbriquées et caractérisées par des rampes et paliers tectoniques ainsi que des failles en retour (fig. 2). Les axes de plis métriques (presque exclusivement développés dans les niveaux des Couches Rouges) ont une dispersion analogue à celle rencontrée dans les Médiannes Plastiques (fig. 2, stéréogrammes synthétiques).

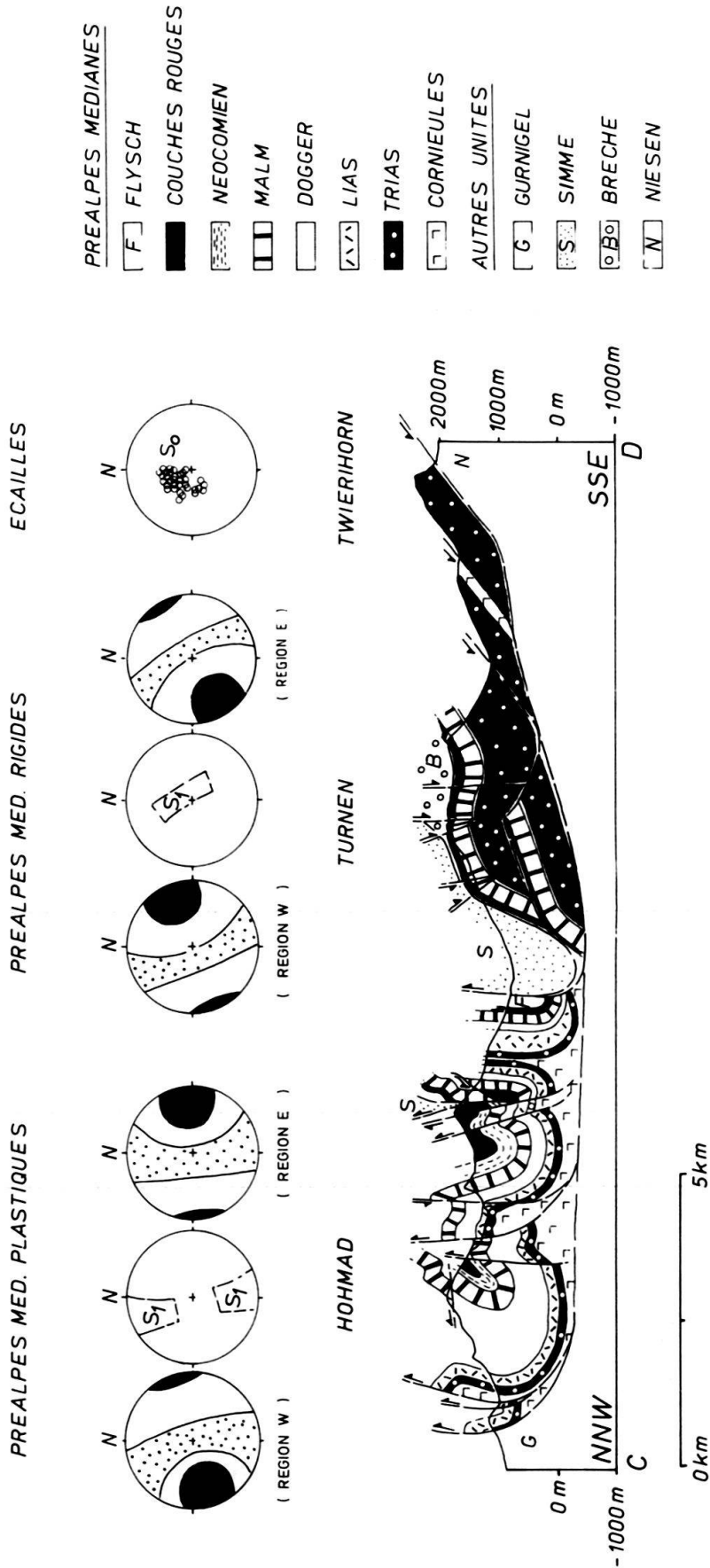


Fig. 2. Coupe structurale dans les Préalpes médianes Romandes de l'Est. Au dessus de la coupe sont présentés les stéréogrammes synthétiques construits à partir de nombreux relevés de terrain (Mosar 1988a). Les plages en noir représentent les axes de plis, les plages pointillées les pôles de la stratification. S<sub>1</sub> correspond à la schistosité, S<sub>0</sub> aux pôles de la stratification. Les canevass sont des représentations équiangulaires (Wulff) en hémisphère supérieure. Associés au chevauchement basal des Préalpes médianes, et non représentés sur cette coupe sont des wildflysch à olistolithes d'Ultraschweiz et des gypses.

Dans les niveaux incompetents à alternances de calcaires et marnes on observe un clivage schisteux espacé, parallèle au plan axial des plis métriques. Le fort éventail qu'on observe dans l'orientation du clivage est occasionné par les différences de compétence entre les différents niveaux, mais aussi par l'inclinaison très variable des plans axiaux des plis métriques (parfois subhorizontaux) par rapport aux plans axiaux des plis à grande échelle en général fortement redressés. Dans l'ensemble ce clivage schisteux est très redressé dans les Médiannes Plastiques, mais subhorizontal dans les Médiannes Rigides, (fig. 2 stéréogrammes synthétiques). Il fait ici un angle faible avec la stratification et le plan de chevauchement séparant les Médiannes Rigides de la nappe de la Brèche sus-jacente (MOSAR 1988a).

Le *changement de style tectonique* entre les Médiannes Plastiques et Rigides coïncide avec un *changement de l'intensité du métamorphisme*. Grâce à une étude de la cristallinité de l'illite dans les niveaux du Malm et des Couches Rouges (Crétacé sup.-Tertiaire) nous avons pu montrer qu'on passe de la diagenèse au front de la nappe (Médiannes Plastiques) à des faciès d'épizone à l'arrière de la nappe (Médiannes Rigides) (MOSAR 1988a,b). Nous avons pu déduire de ces observations non seulement que la couverture des Médiannes Plastiques est restée faible pendant toute leur histoire, alors qu'elle devait atteindre environ 10 km dans les Médiannes Rigides, mais aussi que le *métamorphisme est transporté!*

Paramètres descriptifs des divers types d'ellipses et mode de calcul:

rapports axiaux de l'ellipsoïde de déformation:

$$R_{xy} = \frac{x}{y} = \frac{1 + e_1}{1 + e_2} \quad R_{yz} = \frac{y}{z} = \frac{1 + e_2}{1 + e_3}$$

R<sub>i</sub> = rapport axial initial

R<sub>f</sub> = rapport axial final (de forme)

R<sub>s</sub> = rapport axial de l'ellipse de déformation

Paramètres de forme:

$$v = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \quad (\text{LODE 1926, HOSSACK 1968})$$

Paramètres d'intensité de déformation:

$$\gamma_0 = (2/3)[(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2]^{1/2} \quad \text{Natural octahedral unit shear} \\ (\text{NADAI, 1963})$$

$$\bar{\varepsilon}_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \bar{\gamma}_0 \quad \text{Amount of strain} \quad (\text{NADAI 1963, HSÜ 1966})$$

$$r = R_{xy} + R_{yz} - 1 \quad \text{Deformation intensity} \quad (\text{WATTERSON 1968})$$

Tableau I: Formulations mathématiques des divers paramètres utilisés dans le texte.

Contrairement aux nappes Helvétiques avoisinantes (fig. 1) qui sont aujourd'hui des régions classiques de l'étude de la déformation interne des roches, aucune étude n'a été entreprise dans cette direction jusqu'à ce jour dans les Préalpes, si ce n'est quelques observations isolées sur des ammonites aplaties. Nous avons étudié de façon quantitative et qualitative la déformation interne des calcaires par l'intermédiaire de lames minces prises dans divers niveaux le long d'un profil orienté NNW-SSE dans les Préalpes médianes de l'Est (fig. 2).

La description qualitative et quantitative de la déformation passe par la notion d'ellipsoïde de déformation, dont l'aspect peut être formulé et représenté graphiquement de diverses manières. Indépendamment des méthodes utilisées pour calculer la déformation, de nombreux paramètres, dont les plus importants sont donnés dans le tableau I, permettent de décrire les résultats obtenus (pour plus de détail le lecteur pourra se référer à RAMSAY (1967) et RAMSAY & HUBER (1983, 1987). Ainsi, pour présenter un ellipsoïde de déformation finie (EDF) donné, on utilise des paramètres de forme permettant de distinguer les formes aplaties des formes allongées. Pour décrire la quantité de déformation, on utilise des paramètres d'intensité et des paramètres de variation de volume (tableau I). Nous avons, dans ce travail et pour des raisons pratiques, choisi d'utiliser le paramètre «v» de LODE (1926; HOSSACK 1968) pour décrire la forme de l'ellipsoïde de déformation et les paramètres «r» de WATTERSON (1968) et « $\epsilon_s$ » de NADAI (1963) pour décrire l'intensité de la déformation.

## 2. Etude qualitative et quantitative de la déformation

### 2.1 Pellets et oïdes

Presque toutes les formations stratigraphiques des Préalpes médianes contiennent des niveaux à pellets permettant de quantifier la déformation. Nous avons ainsi pu faire une série continue d'analyses le long d'une coupe NNW-SSE (fig. 2) en travaillant sur des échantillons de roches calcaires du Néocomien, du Malm, du Dogger, du Lias et du Trias (tableaux IV-V). La majorité de ces échantillons sont des roches à matrice micritique ou finement sparitique englobant des pellets eux-mêmes de constitution micritique. Plus rares sont les oïdes au cœur formé par un grain de sparite et montrant une gaine bien développée.

Les pellets étudiés sont rarement sphériques mais essentiellement de forme ovoïde (fig. 3A) et assimilables à des ellipsoïdes. Leurs rapports axiaux initiaux  $R_i$  (en deux dimensions) varient entre 1.000 et 4.167 avec une moyenne arithmétique de 1.322 et

Mean:	Std. Dev.:	Std. Error:	Variance:	Coef. Var.:	Count:
1.332	.282	.009	.079	21.144	903

Mode:	Geo. Mean:	Har. Mean:	Kurtosis:	Skewness:
1	1.306	1.284	12.268	2.106

Tableau II: Paramètres statistiques concernant les mesures de rapports axiaux faites sur les échantillons n° 81, 91, 99 et 100, qui ont une déformation  $R_s=1$  (pas de déformation) d'après la méthode  $R_f/\emptyset$  de LISLE (1985).

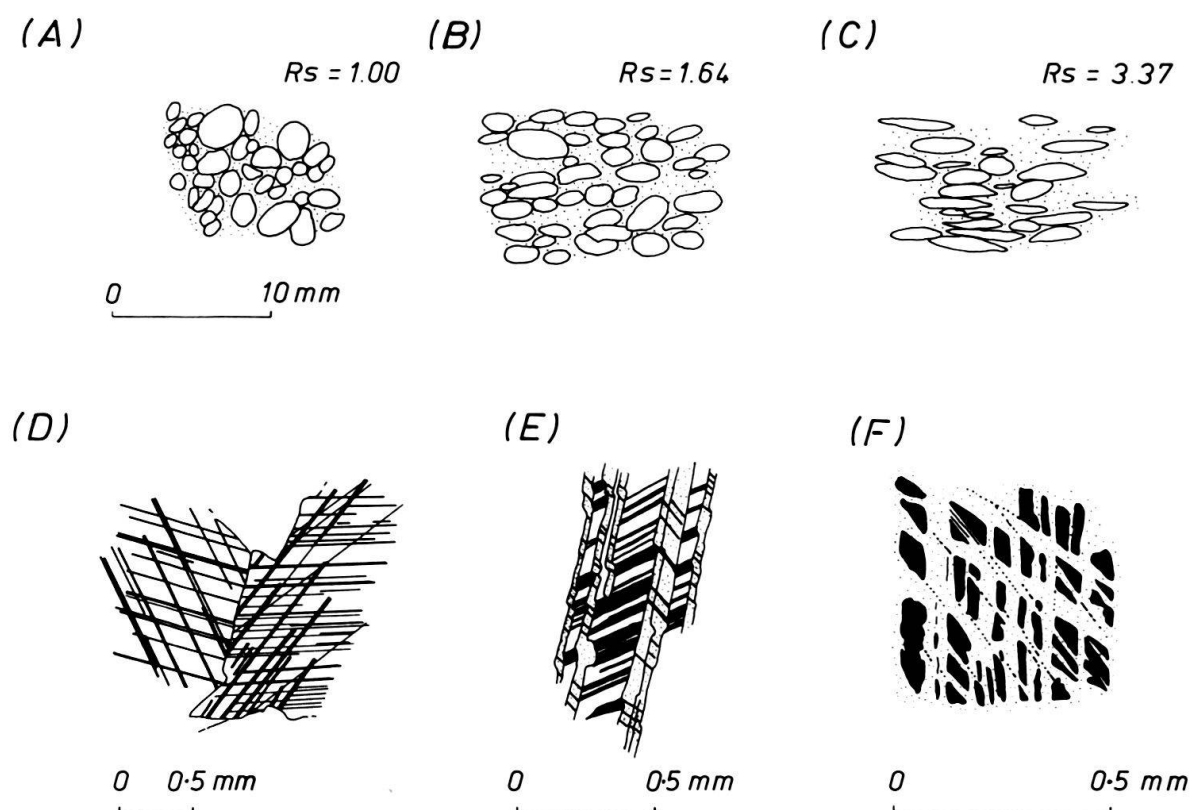


Fig. 3. Figures et témoins de la déformation observés en lame mince dans les Préalpes médianes. A – C: Pellets déformés à divers degrés.  $R_s$  = rapport de l'ellipse de déformation calculée par la méthode de LISLE. En pointillé la matrice micritique. D – F: Macles de la calcite à divers stades de la déformation. Détail voir tableau III.

un écart de 0.282 (tableau II). Ces valeurs ont été obtenues pour une population de 903 pellets considérés comme non déformés (échantillons n° 81, 91, 99 et 100, où l'une des méthodes  $R_f/\varnothing$  utilisée plus loin a donné une déformation  $R_s=0$ ). BURKHARD (1986a, b, 1988) donne des valeurs entre 1.3 et 1.4 pour des pellets non déformées provenant de calcaires du Dogger du Jura bâlois.

## 2.2 Quantification de la déformation des pellets

La quantification de la déformation des objets ellipsoïdaux implique que les objets étudiés sont déformés de manière homogène au moins à l'échelle de la lame mince. Il est nécessaire de savoir s'il existe dans la roche des structures sédimentaires originelles, car elles peuvent introduire des erreurs non négligeables (SIDDANS 1971; PATERSON 1983; LISLE 1985; BORRADAILE 1987). La méthode polaire d'ELLIOTT (1970) nous a permis de montrer que dans nos échantillons il n'y a pas de fabrique sédimentaire originelle. Afin de déterminer l'ellipsoïde de déformation finie (EDF), nous avons calculé des ellipses moyennes de déformation en deux dimensions pour trois faces mutuellement perpendiculaires d'un même échantillon. Ces résultats ont ensuite été combinés à l'aide du programme PASE5 de ROBERTS & SIDDANS (1971) afin d'obtenir un ellipsoïde de déformation finie.



Peu de travaux indiquent le nombre d'objets qu'il faut mesurer afin d'obtenir un résultat «réaliste» le plus «correct» possible, au moins du point de vue des calculs statistiques. Ainsi DUNNET (1969) suggère un minimum de 40 oolithes et de 40–100 galets pour sa technique RF/Ø. TOBISH et al. (1977), en utilisant la méthode polaire d'ELLIOTT (1970) considèrent que 42–70 marqueurs sont nécessaires. La méthode d'analyse statistique sur le nombre de mesures requises, présentée par ROBIN & TORRANCE (1987, fig. 2 p. 315), montre que dépassé 50 marqueurs, la différence (écart type) entre la moyenne «vraie» et la moyenne «calculée» pour un intervalle de confiance donné (p.ex. 95%), ne change qu'insensiblement. Dans nos échantillons nous avons, dans la mesure du possible, essayé d'avoir entre 40 et 100 mesures par face analysée. Font exception quelques échantillons avec seulement 25 à 35 mesures. Ce sont exclusivement des échantillons où la déformation est élevée et les pellets allongés bien réglés, permettant ainsi un contrôle visuel.

Afin de calculer  $R_s$  nous avons utilisé la technique  $R_f/\varnothing$  introduite par CLOOS (1947) et RAMSAY (1967) et développée par DUNNET (1969) et DUNNET & SIDDANS (1971). Nous avons employé la version de LISLE (1977a, b) décrite dans PEACH & LISLE (1979) et PFIFFNER (1986c) introduisant les courbes theta. Une autre technique employée est la méthode des graphiques polaires d'ELLIOTT (1970). Une troisième méthode appliquée est la technique centre à centre présentée par HANNA & FRY (1979) et FRY (1979a, b). Cette méthode, qui renseigne sur la déformation totale de la roche n'a cependant pas pu être appliquée à tous les échantillons.  $R_s$  et  $\varnothing$  ont été déterminés visuellement et les résultats sont essentiellement qualitatifs. Les valeurs obtenues sont en faible accord avec celles obtenues par les autres méthodes, p.ex. la technique RF/Ø de Lisle (fig. 4). En effet dans quelques cas la déformation est plus élevée dans l'ensemble de la roche ( $R_s$  Fry) que dans les pellets plus rigides ( $R_s$  Lisle)

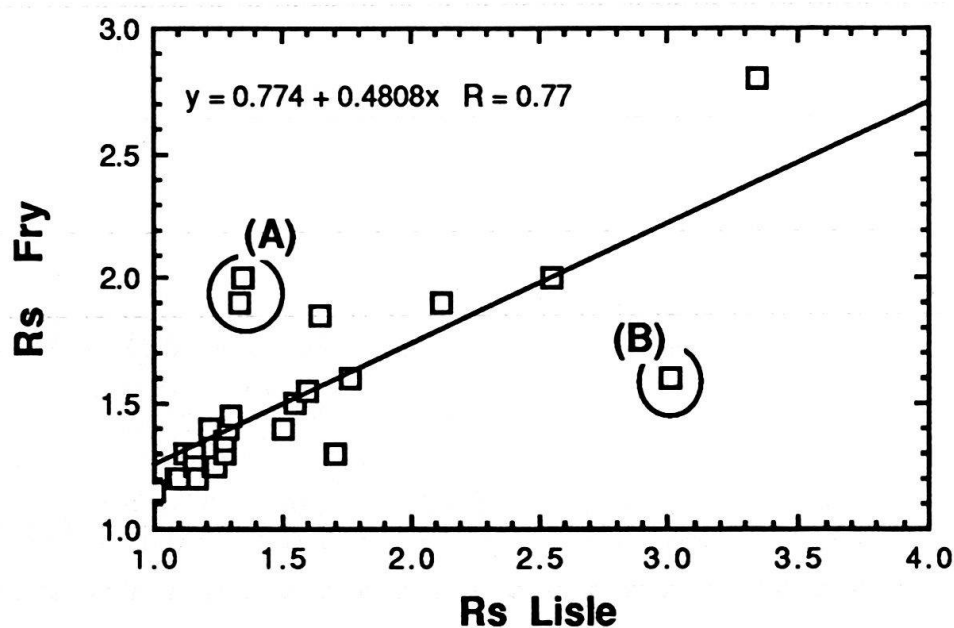


Fig. 4. Rapports de l'ellipse de déformation obtenus par la méthode  $R_f/\varnothing$  de LISLE et la méthode centre à centre de FRY. Sont inscrits dans le diagramme la corrélation linéaire et le coefficient de corrélation R. (A) et (B) réfèrent à des types de déformation décrits dans le texte.

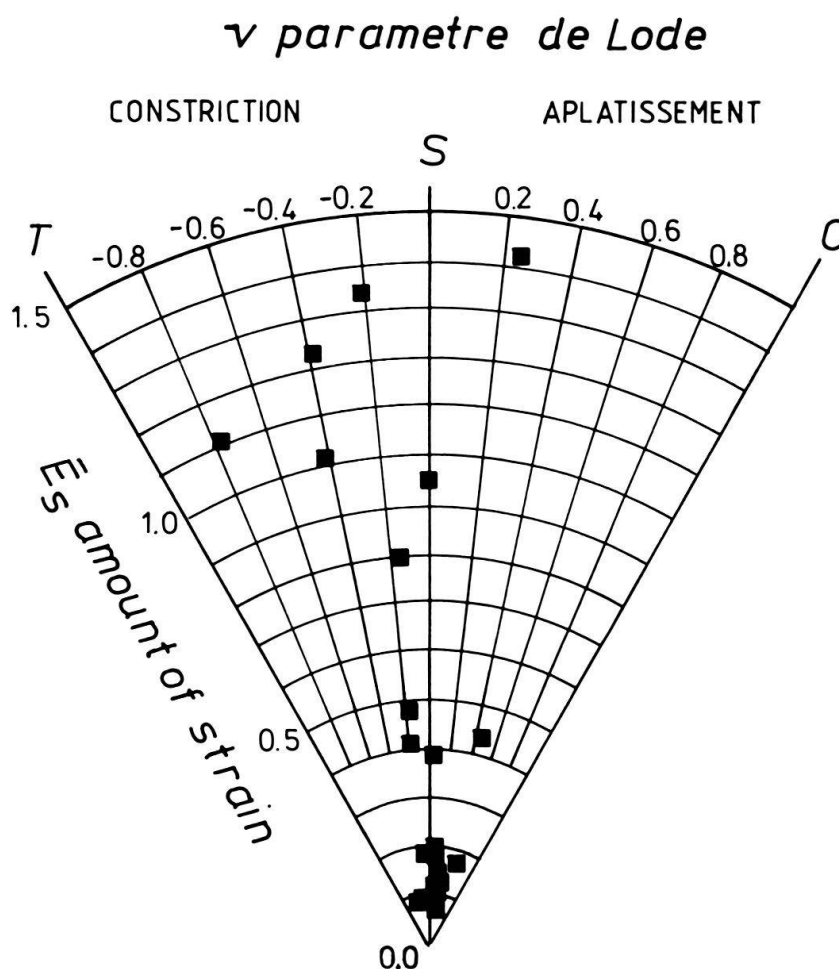


Fig. 5. Diagramme de Hsü (1966) pour les pellets. T = axe de tension, S = axe de déformation plane, C = axe de compression (formulation mathématique des paramètres  $\nu$  et  $\epsilon_s$ , voir tableau I).

(fig. 4, points désignés par A). Il y a aussi un exemple bien marqué où les pellets se déforment nettement plus que l'ensemble de la roche, donnant l'image d'un «fromage troué» (fig. 4, point désigné par B). Ces quelques observations contredisent le prémisses de l'absence de contraste de ductilité entre matrice et marqueurs. On peut cependant penser que les conditions permettant d'appliquer la méthode de Fry, à savoir une distribution statistiquement uniforme (RAMSAY & HUBER 1983, p. 109) ne sont pas données dans nos échantillons et ne permettent donc pas d'avoir des résultats probants.

Les résultats obtenus par la méthode  $R_f/\emptyset$  (tableau IV) montrent que nous sommes en présence d'ellipsoïdes du type constriction et du type aplatissement. Reportés dans un diagramme des Hsü (1966) les résultats semblent indiquer qu'avec une déformation croissante on passe d'un ellipsoïde de déformation en aplatissement (voire plane) vers des ellipsoïdes en constriction (fig. 5).

### 2.3 Macles de la calcite

De nombreux auteurs dont GRIGGS (1953), TURNER et al. (1954) et FRIEDMANN et al. (1976) pour n'en citer que quelques uns, ont utilisé le maclage de la calcite comme

indicateur de la contrainte et de la déformation dans les roches. Les principaux éléments cristallographiques de la calcite sont décrits par exemple chez WENK (1985). Leurs relations avec les paramètres de la déformation sont données dans TURNER (1953), GROSHONG (1972, 1974) et LAURENT et al. (1981). D'après SCHMID (1982), SCHMID et al. (1987) et WENK (1985) l'importance du maclage de la calcite diminue avec la diminution de la taille des grains mais aussi avec l'augmentation de la température. GROSHONG et al. (1984a) suggèrent qu'à partir d'environ 300 °C, température qui correspond à un métamorphisme à la limite anchizone-epizone (FREY 1986), le maclage n'est plus compétitif en tant que mécanisme de déformation intracristallin. Il est relayé par d'autres mécanismes tel p.ex. le fluage-dislocation.

### 2.3.1 Etude qualitative du maclage de la calcite

L'ubiquité des grains sparitiques de calcite dans les roches des Préalpes médianes et dans les unités à flyschs encaissantes, a permis de réaliser des observations continues sur une coupe NNW-SSE (fig. 2). Dans les divers horizons lithologiques du Trias,

INTENSITE DEFORMATION	MACLAGE DE LA CALCITE	TEMOINS DE LA DEFORMATION	METAMORPHISME (MOSAR, 1988a)
très faible	macles rectilignes et fines, les 3 systèmes peuvent être développés (fig.3D)		Diagenèse
faible	nombreuses macles fines et rectilignes	extinction onduleuse	Anchizone
moyenne	macles larges et rectilignes		
forte	Macles très nombreuses difficulté à différencier macle et hôte. On trouve des macles maclées et des macles courbes (fig.3E)	recristallisation dans les macles	Epizone
très forte		fantômes d'anciennes macles entièrement recristallisées (fig.3F)	

Tableau III: Correspondances entre intensité de déformation observée au microscope optique (maclage de la calcite et autres témoins de la déformation interne de la roche) et intensité métamorphique.

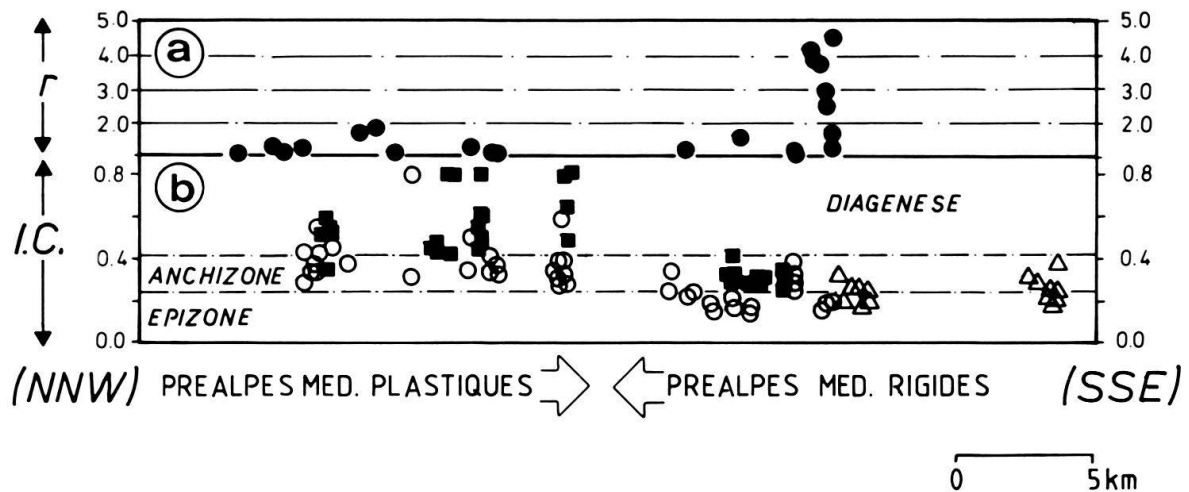


Fig. 6. Evolution de l'intensité de la déformation et du degré de métamorphisme associé en fonction de la position structurale de chaque échantillon analysé dans la nappe des Préalpes médianes. (a) intensité de déformation  $r = R_{xy} + R_{yz} - 1$  (WATTERSON, 1968) mesurée sur des pellets; (b) cristallinité de l'illite (I.C. = index d'après KÜBLER, voir MOSAR, 1988a, b); triangles = échant. du Trias des Préalpes médianes rigides, carrés = échant. du Malm, cercles = échant. de Couches Rouges (Crétacé sup. - Tertiaire). Les limites NNW et SSE de ce diagramme correspondent aux limites de la coupe de la fig. 2.

Lias, Dogger, Malm et Néocomien, la sparite apparaît sous forme de matrice ou ciment ou encore comme claste dans une matrice micritique. Dans les différents types de veines la calcite apparaît sous forme fibreuse ou équigranulaire. Fréquemment il s'agit de veines à ouvertures multiples comme l'indiquent des traces de «crack and seal» et des études par thermoluminescence (METTRAUX, comm. orale). Le fait que bon nombre de fibres sont courbes montre que les ouvertures successives (incrément de l'extension) ne se sont pas produites de manière coaxiale.

Le type, la forme et l'aspect des macles changent au fur et à mesure que la déformation devient plus intense (fig. 3 D-F). Cette évolution est esquissée dans le tableau III. L'augmentation de la déformation dans les Préalpes médianes est intimement liée à l'augmentation de l'intensité du métamorphisme (fig. 6, concernant les pellets; tableau III, concernant le maclage de la calcite). Nos observations semblent confirmer la proposition de GROSHONG et al. (1984a) que le relais du maclage de la calcite par d'autres mécanismes de la déformation se fait à la limite anchizone-épizone, soit environ vers 300°C.

### 2.3.2 Quantification de la déformation par le maclage de la calcite

La méthode base sur le principe qu'à chaque macle on peut attribuer une direction de compression (C) et de tension (T) pour former cette macle (TURNER 1953; TURNER & WEISS 1963). Si pour un nombre élevé de grains on peut mettre en évidence une orientation préférentielle de C et T, ces maxima peuvent être interprétés comme direction de compression (raccourcissement) respectivement de tension (allongement). Alors que la méthode de TURNER se base sur une orientation «optimale» (45° entre l'axe de compression et le plan de cisaillement), celle proposée par PFIFFNER & BURKHARD (1987) tient compte du dièdre de compression entier. D'autres méthodes per-

N°	GEO. COORD		R	DEFORMATION						T	AZIMUTH/PENDAGE					
				X	Y	Z	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>		X	Y	Z	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>
<b>NAPPE DES PREALPES MEDIUMES PLASTIQUES</b>																
41	569.550	147.000	M	1.09	1.05	0.87	5.12	0.60	-5.72	M	197/40	80/28	327/38	225/07	132/28	328/62
47	569.800	152.150	M	1.15	1.00	0.87	2.71	0.94	-3.64	M	34/15	129/20	269/65	29/20	254/62	126/18
81	607.920	170.240	M	1.00	1.00	1.00	2.81	-0.93	-1.88	V	—	—	—	117/55	222/10	318/33
82	607.770	170.030	D	1.07	1.01	0.93	2.50	-0.37	-2.13	V	150/24	318/65	058/04	167/69	73/02	343/21
84	608.060	168.810	M				3.73	1.10	-4.83	M				297/08	198/46	35/43
85	608.450	168.020	F				3.87	-0.34	-3.53	M				80/10	340/44	179/44
85	"	"	F				3.90	-0.11	-3.80	V				67/03	335/33	162/57
85	"	"	F				3.25	0.13	-3.38	MV				69/10	329/44	169/45
86	602.220	168.570	N				2.88	0.39	-3.27	M(V)				274/42	140/38	29/26
87	602.050	168.650	N	1.07	0.98	0.96	1.86	0.36	-2.18	M	38/42	189/45	294/14	309/01	216/74	39/16
88	602.600	169.280	N				7.68	-1.11	-6.57	M(V)				90/28	185/09	292/61
89	602.830	171.100	L				5.36	0.62	-5.98	M				88/19	180/06	287/70
90	604.000	172.740	M	1.00	1.00	1.00	2.81	-0.67	-2.14	V	—	—	—	189/47	311/27	59/31
91	604.120	172.880	D	1.13	1.00	0.88	3.99	-0.51	-3.48	V	86/10	353/20	202/68	70/46	193/27	301/31
92	604.080	173.030	D	1.08	1.00	0.92	1.95	1.17	-3.52	V	225/35	124/14	16/52	240/05	149/09	356/80
93	603.000	173.940	D	1.07	0.99	0.95	3.21	1.13	-4.34	M	16/02	283/60	107/30	7/05	274/33	104/57
98	604.320	171.140	D	1.10	1.02	0.90	4.32	-1.73	-2.58	M	296/54	147/32	48/16	129/24	15/43	239/38
99	604.380	171.600	L	1.00	1.00	1.00					—	—	—			
100	604.450	171.790	L	1.00	1.00	1.00	3.35	-0.08	-3.27	V	—	—	—	165/27	262/12	14/60
102	601.950	168.550	D				4.91	-0.50	-4.40	M				231/35	88/48	335/19
105M	602.250	168.220	F				5.61	1.29	-6.91	M				121/24	224/26	355/54
105V	"	"	F				6.17	1.25	-7.42	V				273/22	122/65	7/11
105T	"	"	F				5.41	0.26	-5.67	MV				275/10	163/65	10/23
53	587.690	164.780	**				2.46	0.05	-2.51	V				169/40	44/35	289/31
94	588.150	164.900	L **				6.26	0.05	-6.30	M				65/04	331/46	159/43
96	588.150	164.900	L **	1.05	1.00	0.95					294/52	71/39	181/24			
<b>NAPPE DES PREALPES MEDIUMES RIGIDES</b>																
64	597.610	154.850	M	1.43	0.96	0.73	3.75	-0.33	-3.42	M	35/10	294/44	134/44	312/05	47/44	217/46
65	597.790	155.070	M	1.36	0.96	0.77					46/14	288/60	142/25			
72	606.160	159.290	T				1.85	0.48	-2.33	M				189/49	88/09	350/40
73	"	"	T				2.72	0.05	-2.77	V				144/62	41/07	308/27
76	599.610	156.740	F				2.00	1.05	-3.05	V				285/41	163/31	50/34
106	606.750	162.850	T				5.48	-1.03	-4.45	M				225/09	103/74	317/14
107	607.030	163.370	D	2.49	1.18	0.34					46/08	140/32	302/57			
109	605.200	164.330	M	1.29	1.01	0.76	13.05	2.80	-15.86	V	337/06	245/21	80/69	193/03	102/07	304/82
110	606.750	163.970	M	2.74	0.88	0.42	8.38	-1.67	-6.71	MV	287/35	190/11	85/53	262/17	10/45	157/40
111	606.600	163.780	M	2.61	0.81	0.48					300/36	204/09	100/55			
113	598.210	161.590	M	1.07	1.02	0.91					14/55	106/03	200/38			
129	600.800	156.000	D	1.26	1.11	0.71	9.70	3.26	-12.96	M	206/29	314/31	81/47	267/56	8/07	102/33
130	600.880	156.220	D	1.14	1.00	0.88					253/30	350/12	98/58			
132b	600.440	154.850	M	2.24	0.82	0.54	9.05	1.40	-7.65	M	163/26	261/14	22/59	306/09	210/36	48/53
133	600.360	154.950	M	2.46	0.69	0.59	9.48	-1.53	-7.95	M	57/50	301/17	198/33	256/24	354/16	113/61
134	600.250	155.050	M	1.96	1.00	0.51					184/56	281/02	8/34			
135	600.280	155.190	M	1.82	0.94	0.59	7.33	-2.55	-5.08	M	189/25	286/14	39/59	256/37	127/39	10/29
136	601.600	155.930	T				3.04	1.62	-4.66	V				283/47	163/25	56/32
137	601.190	155.710	T				7.54	-1.71	-5.82	MV				164/13	266/39	59/48

Tableau IV: Résultats de l'analyse de la déformation par les méthodes Rf/Ø de Lisle sur les pellets (axes de l'EDF: X=1+E1, Y=1+E2, Z=1+E3) et le maillage de la calcite de Groshong (axes de l'EDF: E1, E2, E3, en %). N°=numéro d'échantillon; GEO. COORD. = coordonnées géographiques d'après le système Suisse; R = appartenance stratigraphique de l'échantillon; T = Trias, L = Lias, D = Dogger, M = Malm, N = Néocomien (Crétacé inférieur), F = flysch, \*\* = échantillons provenant du décrochement Bellegarde-Lac Noir. T = type de matériau dans lequel le maillage de la calcite a été analysé: M = matrice, V = veine, MV = matrice et veine, M(V) = surtout matrice et peu de mesures dans la veine. Déformation: allongements = X et E1, axe intermédiaire = Y et E2, raccourcissements = Z et E3. Azimuth/pendage: orientations des trois axes des EDF calculés pour les pellets et les macles de la calcite.

mettent de calculer, en plus des orientations, l'intensité de la déformation en utilisant le nombre et la largeur des macles dans chaque grain de calcite (GROSHONG 1972, 1974; SPANG 1972). Nous avons dans ce travail employé les méthodes de PFIFFNER & BURKHARD (1987), de SPANG (1972) et celle de GROSHONG (1972, 1974). Vu la similitude des résultats nous avons choisi de ne présenter ici que les résultats obtenus par la méthode de GROSHONG. Les fondements mathématiques et la méthodologie, ainsi que des considérations détaillées sur la précision, l'acuité et les erreurs de la méthode sont discutés dans GROSHONG (1972, 1974), TEUFEL (1980) et GROSHONG et al. (1984a, b).

La déformation maximale qu'on peut obtenir par maclage 'e' de la calcite est de 41% d'élongation et 29% de raccourcissement d'après WENK (1985), 36% respectivement 26% d'après TURNER & WEISS (1963). Avec 17% de déformation cisailante on maclé 50% du grain de calcite et on atteint la limite de mesure significative de la méthode de GROSHONG (1972). TEUFEL (1980) et WENK (1985) montrent que la méthode est le plus performant entre 0% et 11% de déformation. Elle prend en considération des systèmes de macles incompatibles avec le tenseur de déformation général calculé, c'est-à-dire des macles cisillées dans le sens opposé au système général qu'on appelle des «negativ expected values» (N.E.V.; tableau V). Le pourcentage de N.E.V. permet de juger de l'homogénéité de la déformation au niveau de l'échantillon. La méthode donne la valeur de cisaillement calculée à partir de chaque macle. En enlevant 15% des données les plus écartées de la valeur théorique (LD = largest deviation) on réduit l'erreur de calcul de 50% et le pourcentage de N.E.V. diminue (tableau V; voir aussi GROSHONG 1972 et 1974). Les valeurs des intensités de déformation et l'orientation de l'EDF ne sont qu'insensiblement affectées par ces corrections.

### 2.3.3 Résultats de la quantification du maclage de la calcite

Les résultats des analyses du maclage de la calcite sont résumés dans les tableaux IV-V. Nous ne discuterons ici que les données obtenues après avoir enlevé 15% de LD. Les intensités de déformation calculées varient entre 1,85 et 13,05% d'allongement et -1,88 et -15,86% de raccourcissement. Ces mesures ont été faites sur des sparites de la matrice et/ou dans des veines. Dans les échantillons 85 et 105 (tableau IV-V) nous avons analysé les grains de calcite appartenant à la matrice (85M et 105M) et ceux provenant de veines (85V et 105V). La déformation est légèrement plus importante dans les veines que dans la matrice (environ 0,17% à 0,58%). Ceci peut s'expliquer par la taille des grains qui sont plus grands dans les veines, et se maclent plus aisément que ceux, plus petits, de la matrice. Les valeurs obtenues en combinant les deux ensembles de mesures sont inférieures à celles obtenues pour les deux groupes séparément. Les orientations d'axes, calculées pour les deux groupes et pour l'ensemble des mesures, sont très proches les unes des autres. On peut donc penser que la formation des veines est antérieure à la déformation par maclage. Des mesures faites sur un ensemble de calcites fibreuses et un ensemble de calcites équigranulaires dans un système de veines parallèles montrent des résultats analogues. L'intensité de la déformation et l'orientation des axes de l'EDF sont semblables. Calcites fibreuses et calcites équigranulaires enregistrent la déformation de la même manière.

Reportées dans un diagramme de Hsü (1966) les résultats ne montrent pas de tendance marquée pour un type d'ellipsoïde de déformation donné (fig. 7). Il n'y a

LOC	TOTAL des MACLES							TOTAL des MACLES – 15% L.D.						
	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	NBR	NEV	SSE	SV	E <sub>1</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub>	NBR	NEV	SSE	SV
41	4.76	-1.14	-3.62	53	34	0.0616	0.0013	5.12	0.6	-5.72	35	17	0.0362	0.0012
47	4.97	0.07	-5.04	51	43	0.0672	0.0015	2.71	0.94	-3.64	43	40	0.0233	0.0006
53	2.44	0.76	-3.19	57	39	0.0804	0.0016	2.46	0.05	-2.51	48	31	0.0308	0.0007
61	6.42	-1.36	-5.07	50	38	0.1022	0.0023	7.05	-2.84	-4.21	42	36	0.0474	0.0013
64	1.87	-0.03	-1.85	41	44	0.1263	0.0035	3.75	-0.33	-3.42	35	37	0.0344	0.0011
69	6.72	-0.86	-5.86	56	27	0.1541	0.003	7.14	-1.65	-5.5	48	19	0.0525	0.0012
72	1.72	0.47	-2.19	52	25	0.0079	0.0002	1.85	0.48	-2.33	44	16	0.0026	0.0001
73	2.1	1.06	-3.16	51	33	0.0778	0.0017	2.72	0.05	-2.77	43	35	0.0286	0.0008
74	2.29	0.33	-2.62	54	35	0.0422	0.0009	3.2	0.18	-3.38	47	30	0.0185	0.0004
76	2.36	0.44	-2.8	57	32	0.0491	0.0009	2	1.05	-3.05	47	31	0.0181	0.0004
78	2.08	-0.59	-1.49	53	26	0.0064	0.0001	2.17	-0.13	-2.04	45	18	0.0016	0
80	5.78	1.42	-7.2	51	33	0.1767	0.0038	4.35	2.02	-6.38	43	33	0.0644	0.0017
81	1.9	0.24	-2.14	52	29	0.0269	0.0006	2.81	-0.93	-1.88	44	32	0.0075	0.0002
82	3.04	-0.91	-2.14	53	32	0.0203	0.0004	2.5	-0.37	-2.13	45	27	0.0085	0.0002
84	3.89	0.02	-3.91	54	30	0.0612	0.0012	3.73	1.1	-4.83	46	26	0.0199	0.0005
85T	2.46	0.19	-2.64	110	35	0.2026	0.0019	3.25	0.13	-3.38	94	32	0.0556	0.001
85M	1.51	-0.3	-1.22	52	44	0.1264	0.0027	3.87	-0.34	-3.53	44	32	0.0535	0.0014
85V	3.12	0.77	-3.9	58	31	0.0721	0.0014	3.9	-0.11	-3.8	50	26	0.0316	0.0007
86	2.79	0.74	-3.53	55	18	0.0239	0.0005	2.88	0.39	-3.27	47	13	0.0088	0.0002
87	1.81	0.95	-2.76	55	46	0.0531	0.0011	1.86	0.36	-2.18	47	32	0.0236	0.0006
88	5.55	0.64	-6.19	56	20	0.0719	0.0014	7.68	-1.11	-6.57	47	9	0.0242	0.0006
89	5.31	0.79	-6.09	59	36	0.1735	0.0032	5.36	0.62	-5.98	50	34	0.0616	0.0014
90	2.69	-0.72	-2	73	33	0.032	0.0005	2.81	-0.67	-2.14	62	27	0.0158	0.0003
91	3.72	-0.44	-3.28	52	25	0.0371	0.0008	3.99	-0.51	-3.48	44	25	0.0152	0.0004
92	3.05	1.13	-4.18	57	19	0.0402	0.0008	1.95	1.17	-3.52	48	23	0.0085	0.0002
93	5	0.85	-5.84	54	32	0.0609	0.0012	3.21	1.13	-4.34	46	26	0.0235	0.0006
94	5.09	0.49	-5.57	50	28	0.0416	0.0009	6.26	0.05	-6.3	42	19	0.0154	0.0004
98	2.62	-1.06	-1.56	51	29	0.0483	0.0011	4.32	-1.73	-2.58	43	19	0.0203	0.0005
100	3.8	0.32	-4.12	46	35	0.0493	0.0012	3.35	-0.08	-3.27	39	28	0.0143	0.0004
102	4.55	0.54	-5.09	53	11	0.0257	0.0005	4.91	-0.51	-4.4	45	13	0.0081	0.0002
105M	3.18	1.62	-4.8	48	33	0.1204	0.0028	5.61	1.29	-6.91	41	29	0.0427	0.0012
105V	6.96	0.63	-7.59	51	10	0.0457	0.001	6.17	1.25	-7.42	43	5	0.0175	0.0005
105T	4.42	1.08	-5.5	99	24	0.1877	0.002	5.41	0.26	-5.57	84	21	0.0675	0.0009
106	3.98	-0.92	-3.06	50	34	0.0639	0.0014	5.48	-1.03	-4.45	42	29	0.0254	0.0007
109	13.37	-0.11	-13.26	46	35	0.3397	0.0083	13.05	2.8	-15.86	39	36	0.1535	0.0045
110	8.39	-1.63	-6.77	45	42	0.2227	0.0056	8.38	-1.67	-6.71	38	40	0.0727	0.0022
129	9.75	3.92	-13.67	47	21	0.0593	0.0014	9.7	3.26	-12.96	40	17	0.0236	0.0007
132	11.17	-2.46	-8.71	48	23	0.1324	0.0031	9.05	1.4	-7.95	41	19	0.0408	0.0011
133	11.16	-0.94	-10.22	48	13	0.0812	0.0019	9.48	-1.53	-7.95	41	12	0.02	0.0006
135	8.05	-2.79	-5.25	48	38	0.1188	0.0028	7.33	-2.25	-5.08	41	37	0.0495	0.0014
136	2.72	1.82	-4.54	48	31	0.039	0.0009	3.04	1.62	-4.66	41	24	0.0081	0.0002
137	6.72	-1.02	-5.71	46	26	0.0468	0.0011	7.54	-1.71	-5.82	39	15	0.0172	0.0005

Tableau V: Résultats sur l'étude du maillage de la calcite. Loc. = numéro de l'échantillon. E<sub>1</sub> = allongement, E<sub>2</sub> = axe intermédiaire, E<sub>3</sub> = raccourcissement, les valeurs sont exprimées en % de déformation:  $x=1+E/100$ . NBR. = nombre de macles analysées sur deux lames perpendiculaires. NEV = nombre de negativ expected values exprimé en %. SSE = sum of squares of errors. SV = sample variance. L.D = largest deviations.

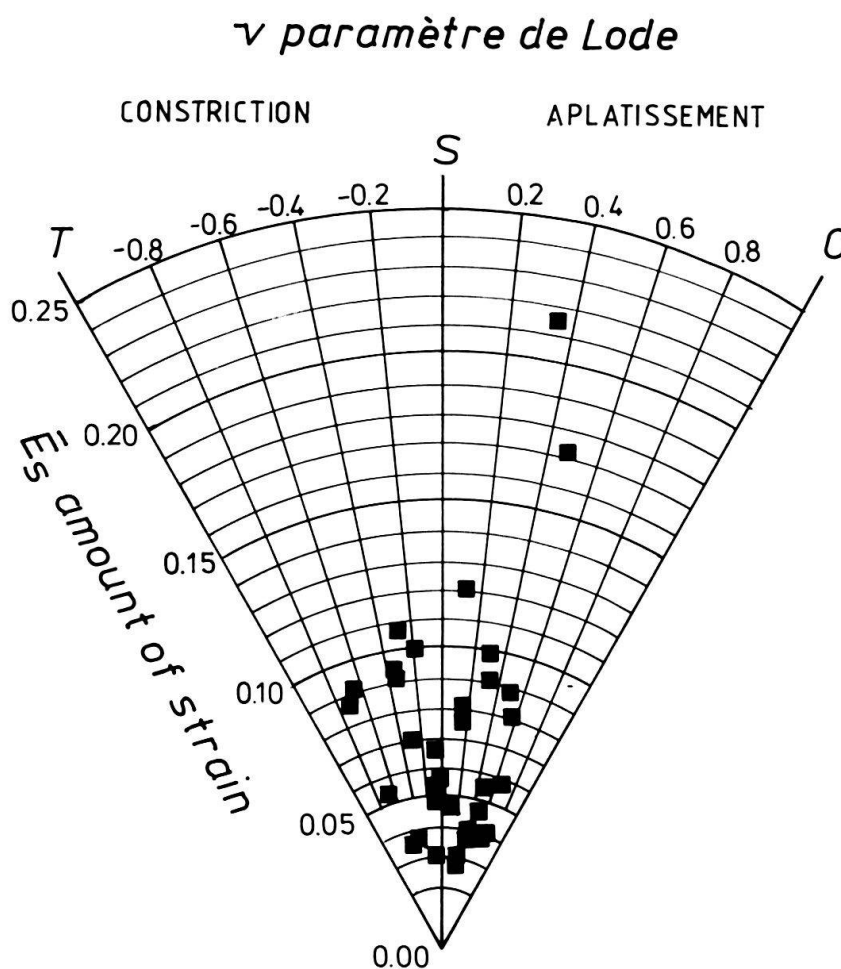


Fig. 7. Diagramms de Hsü (1966) pour les macles de la calcite. T = axe de tension, S = axe de déformation plane, C = axe de compression (formulation mathématique des paramètres  $\nu$  et  $E_s$ , voir tableau I).

apparemment pas de relation simple entre l'évolution de la forme de l'ellipsoïde et l'intensité de la déformation.

GROSHONG (1972, 1974) estime que 40% de N.E.V. est un maximum au-delà duquel on ne peut plus affirmer que la déformation est homogène. Dans des essais en laboratoire avec superposition de deux déformations TEUFEL (1980) observe plus de 40% de N.E.V. Pour une déformation unique et coaxiale il admet jusqu'à 15% de N.E.V. Si GROSHONG et al. (1984a), dans une étude dans les nappes Glaronnaises de Suisse orientale, observent entre 8% et 23% de N.E.V., BURKHARD (1986a, b) dans les unités Helvétiques de Suisse occidentale donne des valeurs entre 8% et 43% pour les N.E.V. Dans notre étude sur les Préalpes nous avons entre 5% et 40% de N.E.V. (tableau V). Peut-on de ce fait encore considérer que la déformation est homogène? Il peut en effet s'agir de plusieurs déformations successives plus ou moins coaxiales, comme le suggère l'existence de deux clivages schisteux distincts dans les Médiannes Rigides (MOSAR 1988a). Il ne nous a cependant pas été possible de séparer pour les macles de la calcite différents incréments de déformation (voir TEUFEL 1980). Un autre facteur dont il faut tenir compte est l'influence d'une possible déformation rotationnelle, contribuant elle aussi à augmenter le % de N.E.V. En effet la possibilité d'un cisaille-



ment important est donnée au toit des Médiannes Rigides par le chevauchement basal de la nappe de la Brèche, ainsi qu'au mur par le chevauchement basal des Préalpes médianes. Il semble raisonnable d'envisager, pour certaines parties tout au moins, un effet combiné de ces deux facteurs.

La comparaison des résultats calculés à partir du maillage de la calcite avec ceux de la distorsion des pellets montre que dans les Médiannes Plastiques la déformation enregistrée par les pellets est du même ordre de grandeur (0 à 10% d'allongement) que celle enregistrée par les macles de la calcite (tableau IV). Dans les Médiannes Rigides au contraire la déformation par maillage est moins importante que celle enregistrée par la distorsion des pellets (tableau IV). Il faut noter que de manière générale la déformation enregistrée par maillage de la calcite est peu importante et ne constitue qu'une partie de la déformation totale enregistrée par la roche. Ainsi les mesures faites dans les Médiannes Rigides reflètent probablement les derniers incréments de la déformation. L'existence de macles maclées, recristallisation de macles, etc. prouve cependant que le maillage a déjà été actif pendant des étapes précédentes de la déformation. Il nous a cependant été impossible de quantifier ces événements antérieurs de la déformation.

#### 2.4 *Dissolution – cristallisation*

Les témoins des phénomènes de dissolution – cristallisation, discutés par de nombreux auteurs, dont par exemple SIDDANS (1972), McCLAY (1977), ROBIN (1979), RUTTER (1983) et GRATIER (1983, 1984), sont abondants dans les calcaires des Préalpes médianes, aussi bien à l'échelle macroscopique que microscopique. Les types de figures les plus fréquents sont: les pellets et ooïdes dissous aux contacts les uns avec les autres; les pics et joints stylolithiques et le clivage schisteux illustrant la dissolution, et les veines à remplissage de calcite, plus rarement de quartz, illustrant la cristallisation. On ne trouve que rarement des remplissages fibreux de quartz ou de calcite dans des zones d'ombres de pression.

La disposition à l'intérieur des plis des joints stylolithiques, du clivage schisteux et des veines va nous permettre de comprendre la cinématique de formation de ces plis. A cet effet nous avons étudié deux plis de taille centimétrique sur plusieurs coupes successives perpendiculaires à l'axe, espacées de 2 à 4 centimètres (fig. 8 et fig. 9 Néocœmien du Vanil Noir). Sur le pli de la fig. 8a on remarque de nombreuses petites veines à remplissages calcitiques. Dans la charnière de pli le nombre de veinules et fractures augmente à tel point qu'il devient impossible de les figurer toutes (grisé de la fig. 8a). On observe des joints stylolithiques perpendiculaires à la stratification (fig. 8b), mais aussi des joints stylolithiques parallèles à la stratification. Ces derniers sont fréquemment confondus avec les parois des veines et ne sont pas spécifiés sur les figures. Dans le second exemple (fig. 9) on observe à l'extrados du pli une forte extension cassante donnant lieu à de nombreuses veines avec remplissage calcitique (fig. 9a). Ces veines sont larges à l'extérieur du pli et disparaissent vers l'intrados pour être relayées par des joints stylolithiques souvent parallèles au plan axial (fig. 9b). Les coupes successives permettent de souligner que les veines n'ont qu'une continuité réduite parallèlement à l'axe.

Ces deux exemples mettent en évidence deux types de joints stylolithiques: ceux parallèles à la stratification qu'on peut rattacher à une origine diagénétique et ceux per-

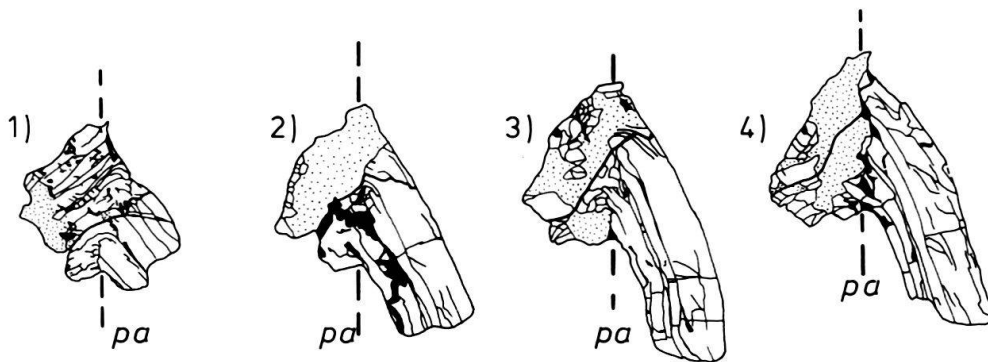
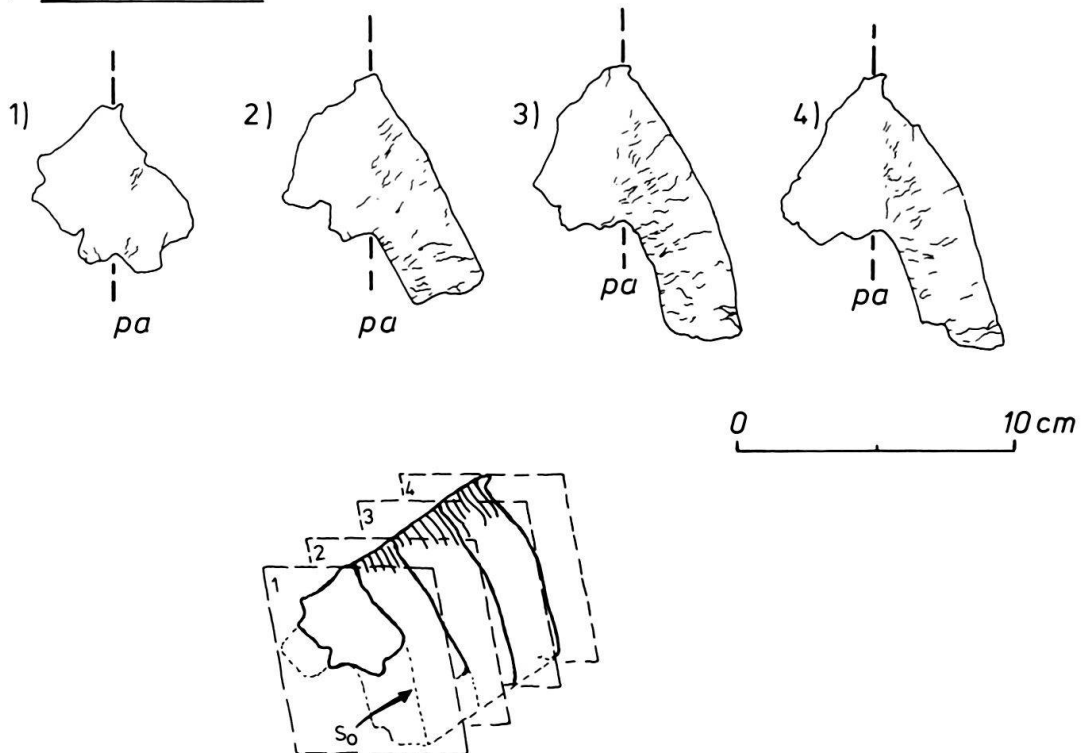
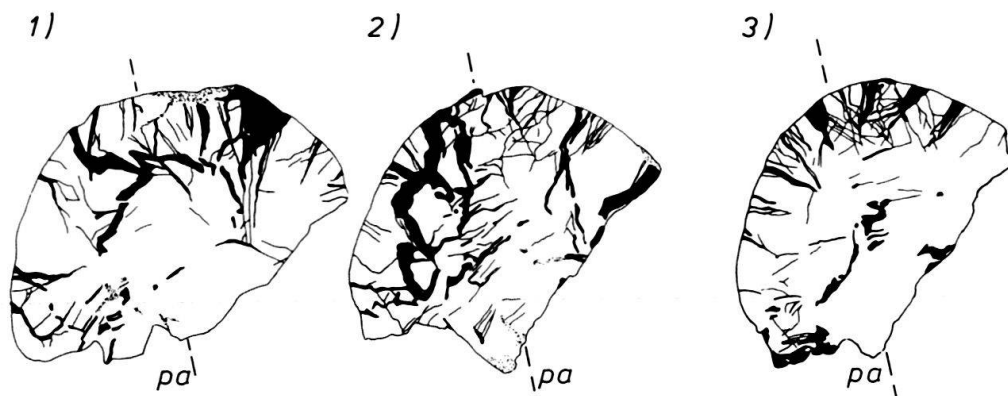
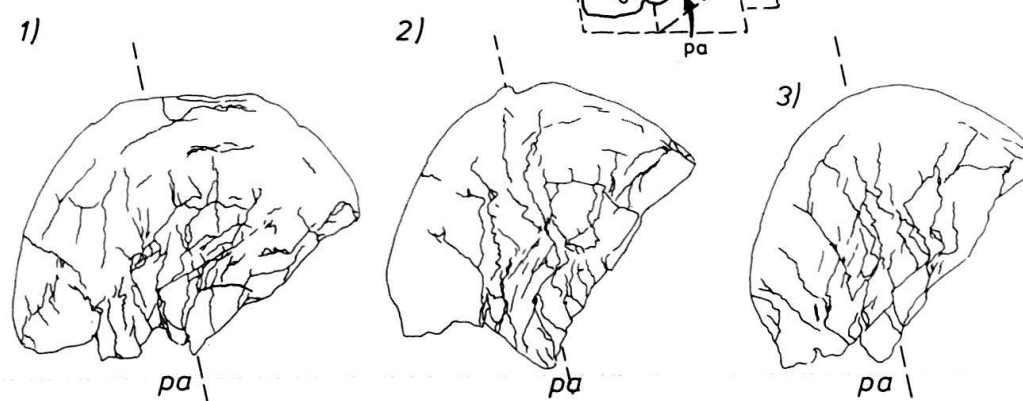
a) VEINES et FRACTURESb) STYLOLITHES

Fig. 8. Analyse de veines et de joints stylolithiques sur un pli provenant du Néocomien du sommet du Vanil Noir. En (a) le figuré en pointillé indique les zones intensément fracturées avec de nombreuses veines; les zones en noir indiquent des veines avec leur remplissage calcitique. So = stratification, pa = trace du plan axial.

pendiculaires à la stratification. Ces derniers sont d'origine tectonique (voir aussi DROXLER & SCHAER 1979) et témoignent d'un raccourcissement parallèle à la stratification indiquant par là même une déformation interne précoce.

L'extension à l'extrados de ces plis (veines) accompagnée d'un raccourcissement à l'intrados indiquent un mode de plissement par déformation longitudinale – tangentielle (RAMSAY 1967). L'existence de joints stylolithiques perpendiculaires à la stratification indique un raccourcissement initial parallèle à la stratification et prédatant la formation du pli.

a) VEINES et FRACTURESb) STYLOLITHES

0 10 cm

Fig. 9. Analyse de veines et de joints stylolithiques sur un pli du Néocomien du Vanil Noir. En (a) le figuré en pointillé indique les zones intensément fracturées avec de nombreuses veines. Les zones en noir indiquent les veines à remplissage calcitique. So = stratification, pa = trace du plan axial. Détail voir texte.

### 3. La déformation dans le cadre de la géologie régionale

#### 3.1 Répartition spatiale de l'intensité de déformation

L'intensité de déformation «r» calculée à partir des *pellets* est faible dans les Médiannes Plastiques. Elle augmente légèrement dans la partie NW des Médiannes Rigides pour devenir très importante dans la partie arrière des Médiannes Rigides (fig. 6a). Elle atteint  $e_1=174\%$  d'extension (avec X grand axe de l'EDF =  $1+e_1/100$ ) et jusqu'à  $e_3=-66\%$  de raccourcissement (avec Z axe court de l'EDF =  $1+e_3/100$ ).

La déformation par *maclage de la calcite* est en général plus faible que celle mesurée sur les *pellets* et ne montre pas de gradient d'intensité de déformation aussi

net. Les différents indicateurs de la déformation qu'on observe au microscope optique (fig. 3; tableau III) montrent une déformation faible dans les Médiannes Plastiques et une déformation plus intense et qui va croissante vers l'arrière dans les Médiannes Rigides. De grains peu et finement maclés on passe à des grains entièrement maclés par des macles larges fréquemment courbes et elles-mêmes maclées. On observe dans la partie méridionale des Médiannes Rigides de nombreuses macles entièrement recristallisées. Cette recristallisation semble être du type dynamique avec migration aux joints de grains, comme c'est le cas dans des échantillons provenant de la base de l'écaïlle de la Gummfluh à proximité du chevauchement basal des Préalpes médianes (comm. orale SCHMID; HUNZIKER et al. 1987). Les mécanismes transgranulaires (dissolution-cristallisation) dominant dans les Médiannes Plastiques sont relayés par des mécanismes intragranulaires dans les Médiannes Rigides.

### 3.2 Orientation des ellipsoïdes de déformation finie

L'orientation spatiale de l'ellipsoïde de déformation finie est examinée en fonction du cadre tectonique (failles, chevauchements, stratification, schistosité et plis).

#### 3.2.1 Analyse bidimensionnelle

Nous avons calculé la forme et l'orientation d'une section de l'EDF parallèle à la coupe de la fig. 2, à l'aide du programme STRELL mis au point par PFIFFNER (1986a, b). Nous avons ensuite reporté pour chaque échantillon le grand axe de l'ellipse correspondante dans la coupe de la fig. 2 (fig. 10). Les résultats obtenus pour les pellets sont semblables à ceux déterminés à partir des macles de la calcite.

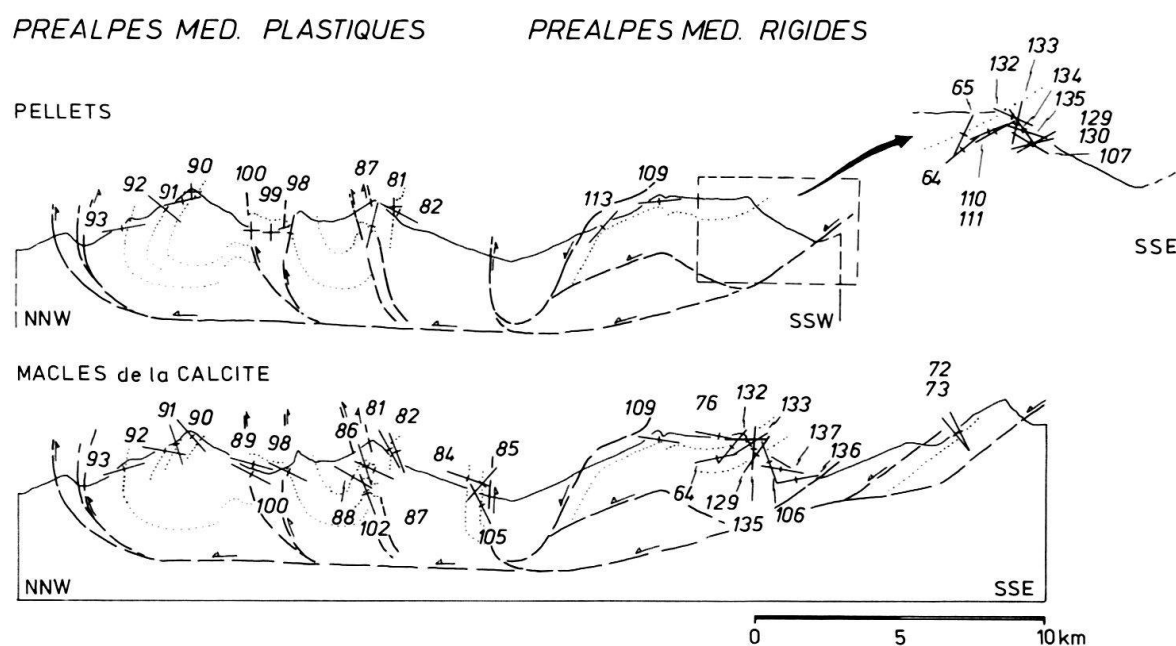


Fig. 10. Distribution de l'orientation bidimensionnelle de la déformation (allongement) le long de la coupe de la fig. 2. En pointillé la trace de la stratification, en traitillé les chevauchements importants. Les chiffres réfèrent aux divers échantillons.

Dans les *Médianes Plastiques* le raccourcissement est plus ou moins parallèle à la stratification (fig. 10). La trace de l'allongement est subperpendiculaire à la stratification, rappelant l'orientation d'un clivage schisteux naissant (comparer aussi avec les joints stylolithiques perpendiculaires à la stratification), avec raccourcissement parallèle à la stratification dans un stade précoce de la déformation. Les échantillons 89 et 100, analysés par la technique du maillage, constituent une exception. Ils sont situés près d'une importante faille chevauchante. Leur raccourcissement est parallèle à la trace de cette faille.

La situation est différente dans les *Médianes Rigides*. Dans la partie supérieure de la nappe, près du chevauchement basal de la nappe de la Brèche et de la nappe Supérieure, ainsi qu'à la base de la première écaïlle des Médianes Rigides, l'extension est subparallèle à la stratification respectivement aux plans de chevauchements (fig. 10) (stratification et plans de chevauchements sont dans les Médianes Rigides plus ou moins subparallèles, MOSAR 1988a). Le parallélisme entre allongement et stratification rappelle l'orientation du clivage schisteux qui, dans la partie supérieure de la nappe (fig. 2), est subhorizontal et parallèle à la stratification et au plan de chevauchement basal de la nappe de la Brèche. Au centre de la nappe des Médianes Rigides et dans l'écaïlle inférieure (échantillons 72 et 73) par contre, l'allongement fait un angle plus fort avec la stratification.

### 3.2.2 Analyse tridimensionnelle

Afin de saisir les *relations tridimensionnelles* entre les plis, la stratification et l'EDF nous avons utilisé des diagrammes inverses (fig. 11) représentant la position des pôles de la stratification et des axes régionaux de plis pour chaque échantillon en fonction d'un repère orthonormé formé par les trois axes  $x$ ,  $y$ , et  $z$  de l'EDF. Dans les Médianes Plastiques et Rigides le raccourcissement est essentiellement subparallèle à la stratification. Cette tendance est plus marquée pour l'EDF calculé à partir des pellets que pour celui obtenu à partir des macles de la calcite (fig. 11). L'absence d'aplatissement parallèle à la stratification indique que l'effet de la compaction était négligeable. Deux tendances ressortent dans les relations entre EDF et axes régionaux de plis. Un premier ensemble d'EDF ont leur extension ( $x$ ) parallèle à l'axe du pli régional. Le raccourcissement ( $z$ )  $y$  est subperpendiculaire à l'axe du pli. Dans un second groupe l'extension ( $x$ ) et le raccourcissement ( $z$ ) sont obliques à la direction de l'axe du pli. Cet angle est plus important pour les résultats obtenus sur pellets (fig. 11).

Afin de considérer chaque mesure séparément, nous les avons reportées dans des stéréogrammes comportant également la stratification locale et le clivage schisteux s'il est observable (fig. 12a et b). Dans les *Médianes Plastiques* il est difficile de voir une relation constante entre EDF et éléments tectoniques, si ce n'est que dans bon nombre de cas le raccourcissement est parallèle ou subparallèle au plan de stratification. Dans les échantillons 87 et 102 (fig. 12b) le raccourcissement ( $z$ ) fait un angle très élevé avec le pôle de la schistosité, alors qu'on pourrait s'attendre à ce qu'il y soit parallèle, comme pour les échantillons 41 et 47 (fig. 13a). Dans les *Médianes Rigides* les observations de l'étude bidimensionnelle semblent se confirmer avec quelques nuances cependant. Dans la partie supérieure de la nappe, près du chevauchement basal de la nappe de la Brèche, nous observons un allongement ( $x$ ) dirigé vers l'W-NW. C'est ici qu'on

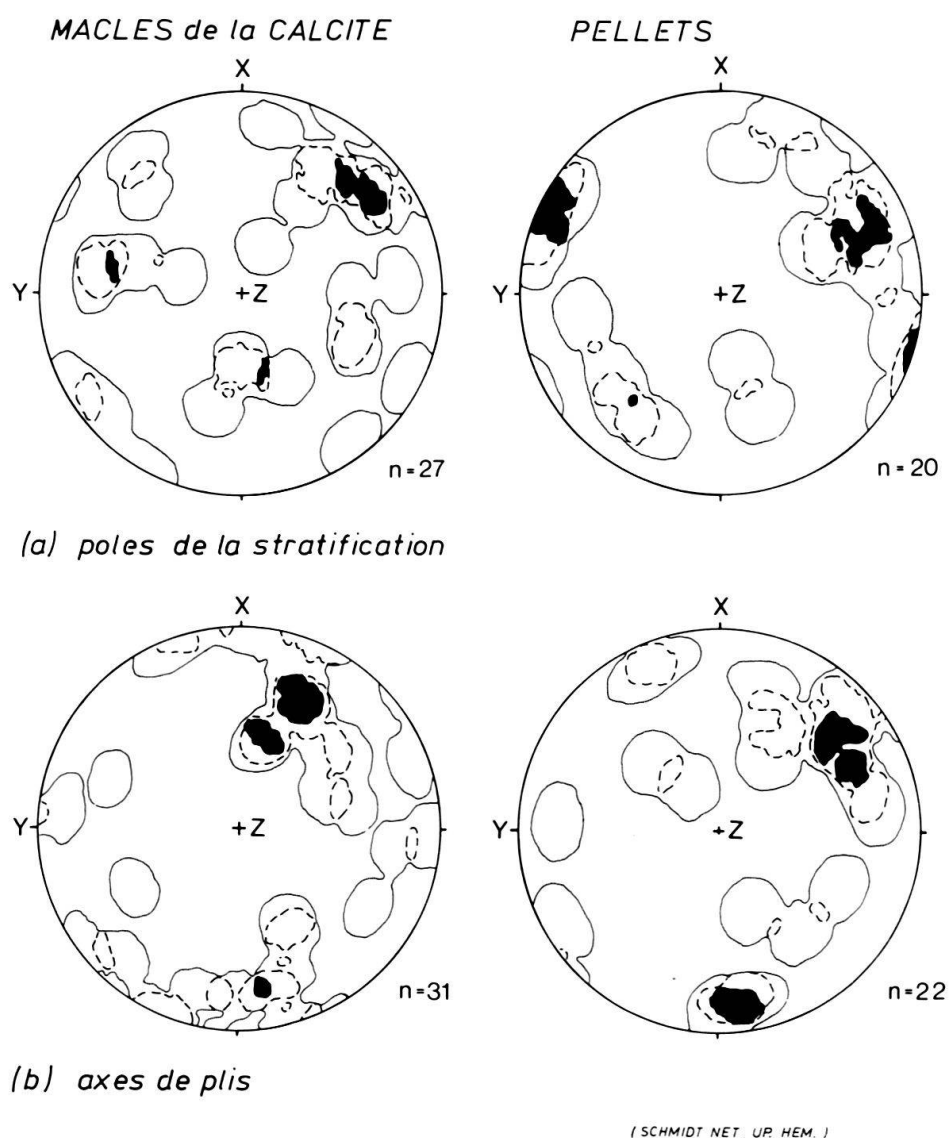


Fig. 11. Diagrammes inverses des ellipsoïdes de déformation pour la stratification et les axes régionaux des plis. (n = nombre de données)

trouve quelques échantillons (n° 109, 110 p.ex) où le raccourcissement (z) se rapproche du pôle de la stratification. Plus bas dans la nappe et vers la base de la première écaïlle, l'allongement (x) est parallèle ou oblique à l'axe régional des plis (NE-SW). Le raccourcissement (z), là aussi, s'écarte de son parallélisme avec le plan de stratification. Au centre de la nappe au contraire le plongement de l'axe de l'allongement (x) est fort. Le raccourcissement est parallèle au plan de la stratification ou s'en rapproche (p.ex. échantillons 72, 73, 135 et 137).

De l'étude de l'orientation des EDFs il ressort que: 1) dans les Médiannes Plastiques le raccourcissement se fait parallèlement à la stratification et est en relation avec la formation des plis; 2) dans les Médiannes Rigides les allongements au toit et au mur de l'écaïlle principale semblent indiquer la direction de transport de cette partie de la nappe et de la nappe de la Brèche sus-jacente. Nous avons pu montrer (sur l'ensemble

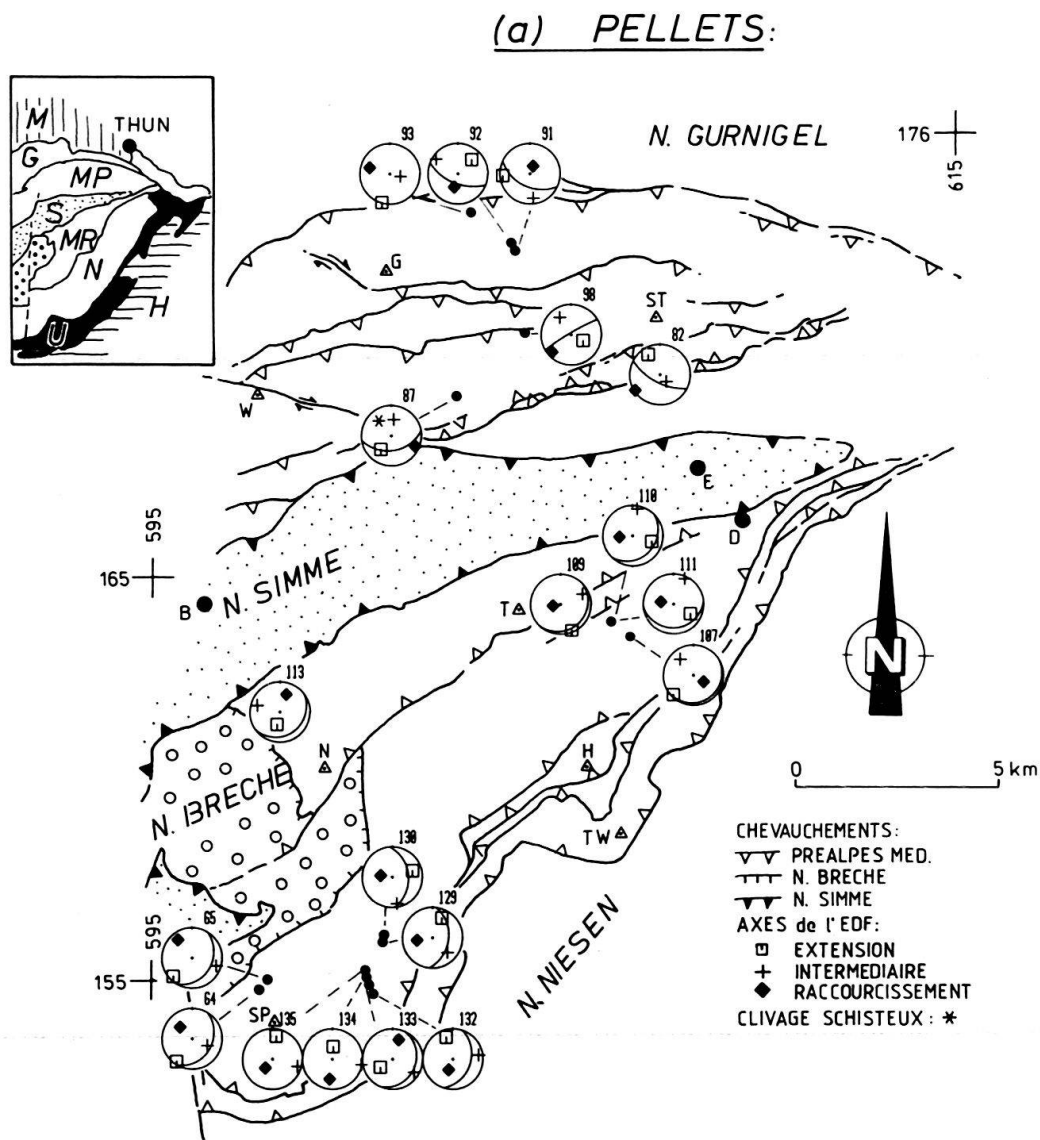


Fig. 12a. Carte tectonique simplifiée des Préalpes médianes de l'Est avec, représentée dans des stéréogrammes, la position des divers EDF calculés à partir de la *déformation des pellets*. Les grands cercles représentent la stratification locale. (Canevas de Schmidt-Lambert hémisphère supérieure.) B = Boltigen; D = Diemtigen; E = Erlenbach; G = Gantrisch; H = Hohmad; N = Niederhorn; SP = Spillgerten; ST = Stockhorn; T = Turnen; TW = Twierhorn; W = Widdersgrind.

des Préalpes médianes; MOSAR 1988a, fig. 11), à l'aide d'axes de plis disposés sur des plans de mouvements (selon des grands cercles sur des stéréogrammes) et à l'aide d'une analyse dynamique de failles et stries de glissement, que les mouvements se font surtout selon des directions NW-SE à W-E, et N-S. Le sens de mouvement, conforme à la polarité générale des Alpes, se fait vers l'avant-pays situé au Nord, Nord-Ouest. On retrouve ces mêmes directions dans les allongements des EDFs au toit et au mur des Médiannes Rigides. 3) Les allongements parallèles aux axes de plis restent difficiles à interpréter. Dans les Médiannes Plastiques on peut penser qu'ils sont associés à l'exten-

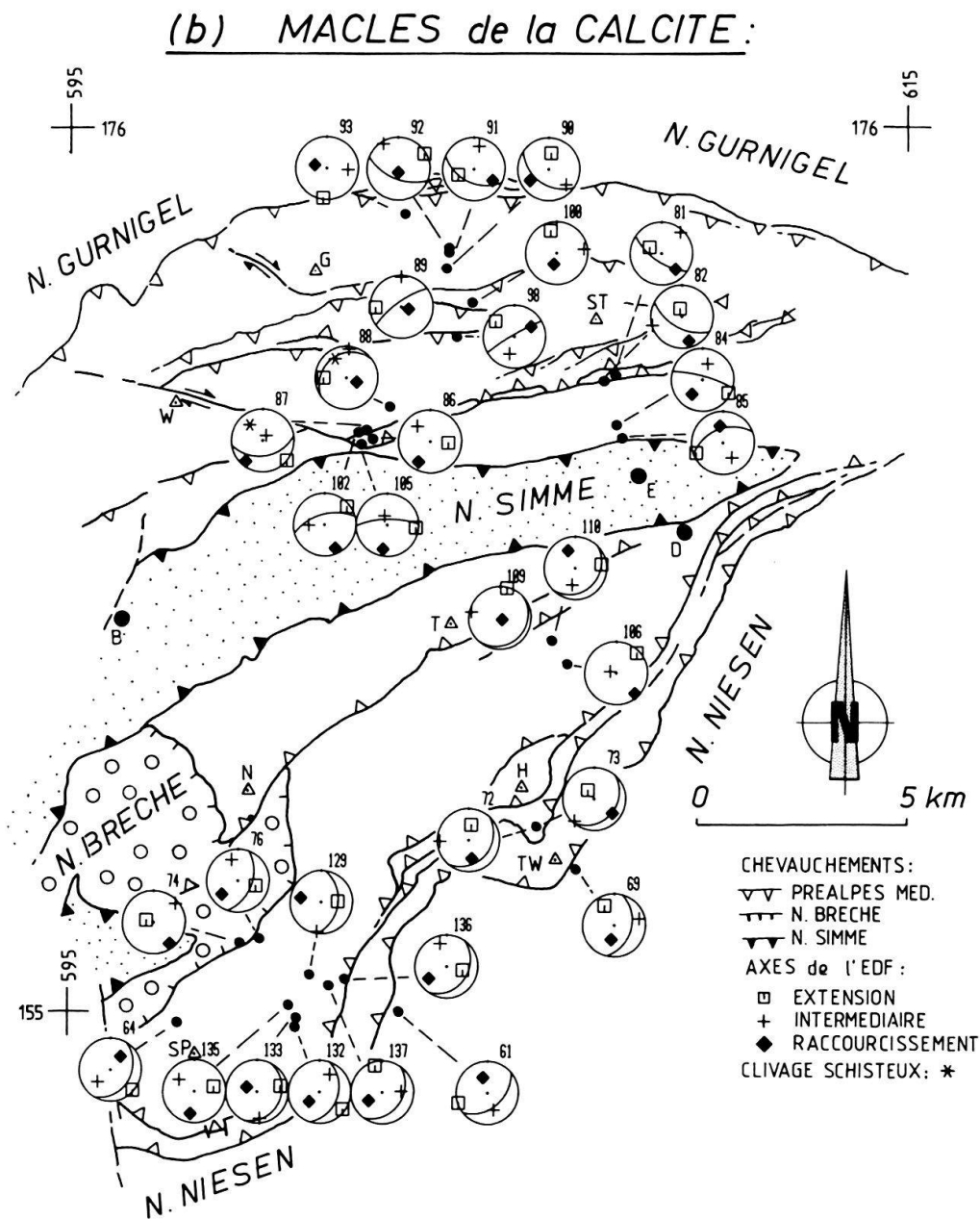


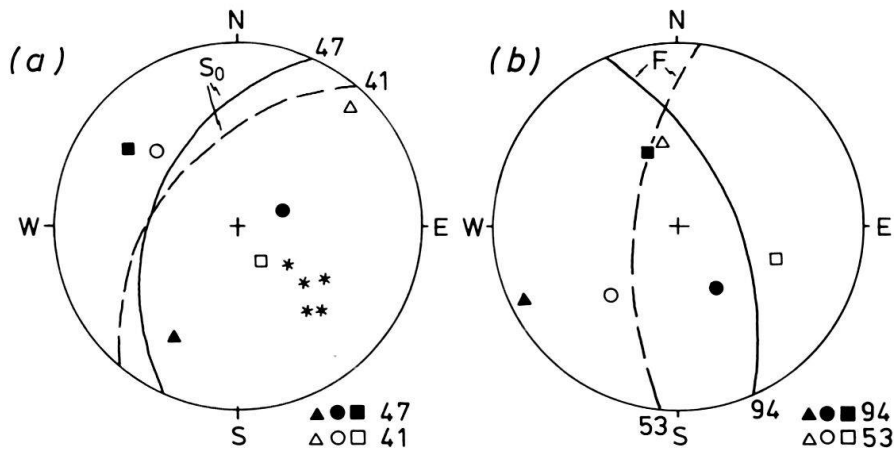
Fig. 12b. Carte tectonique simplifiée des Préalpes médianes de l'Est avec, représentée dans des stéréogrammes, la position des divers EDF calculés à partir du *maclage de la calcite*. Les grands cercles représentent la stratification locale. (Canevas de Schmidt-Lambert hémisphère supérieure).

sion latérale, différentielle qui survient lors de la propagation latérale de plis du type «fault-propagation» (SUPPE 1985). En effet cette propagation crée une courbure de l'axe du pli qui entraîne une extension parallèle à l'axe. Cette hypothèse est soulignée par l'existence de veines d'extension perpendiculaires aux axes de plis et par l'orientation NE-SW, c'est-à-dire parallèle aux axes, de fibres de calcite constituant le remplissage des veines (MOSAR 1988a). Si ce même type de veines et fibres existe dans les Médianes Rigides, l'absence de grands plis y exclut cependant la même explication que dans les Médianes Plastiques.

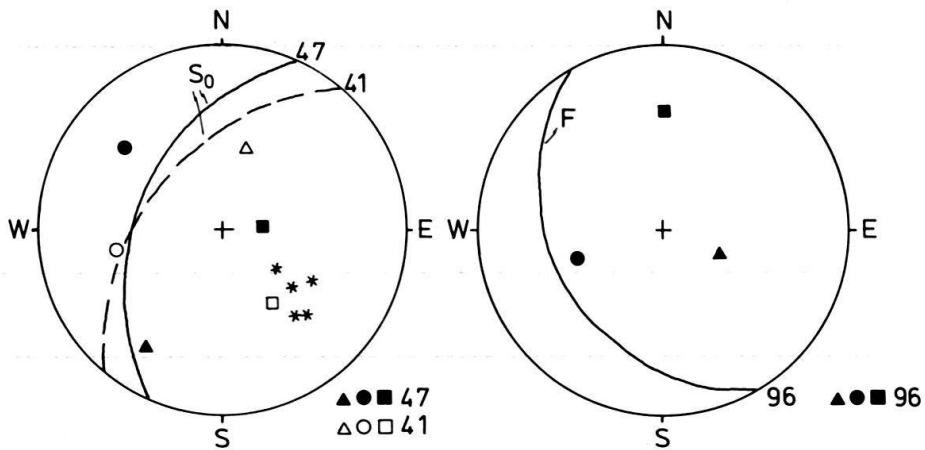


Outre les plis à grande échelle et les chevauchements, les *grands décrochements sénestres N-S* constituent des structures majeures dans les Préalpes médianes. Afin d'étudier les relations de ces derniers avec la déformation interne, nous avons pris comme exemple la zone de Neuschels (Bellegarde-Lac Noir), décrite en détail par PLANCHEREL (1976 et 1979). La fig. 13b résume les résultats obtenus pour trois échantillons pris en association avec trois failles dans la zone de décrochement. Si deux échantillons donnent un raccourcissement N-S, le troisième (53) a son allongement

### MACLES DE LA CALCITE



### PELLETS



AXES DE L'E.D.F

- △ ▲ EXTENSION
- ● INTERMEDIAIRE
- ■ COMPRESSION

$S_0$  STRATIFICATION

- F FAILLES
- \* SCHISTOSITE

(Canevas de Wulff hemisphere sup.)

Fig. 13. Représentations stéréographiques (canevas de Wulff, hémisphère supérieure) des EDF: (a) des Préalpes médianes de l'Ouest: vallée de la Sarine (41: pont de la Tine, 47: carrière à l'W d'Albeuve), (b) de décrochement de Bellegarde-Lac Noir (53, 94, 96).

dans cette direction. L'hétérogénéité dans l'enregistrement de la déformation est ici, comme sur l'ensemble des Médiannes Plastiques, très marquée. De façon générale elle ressort aussi si on compare les résultats obtenus par la méthode des pellets et celle du maclage de la calcite sur un même échantillon. Si, dans de nombreux cas, au moins un des axes principaux (x ou z) a une direction semblable, il y a des cas où les axes des deux EDF ont des orientations différentes (p.ex. les échantillons 98, 82 et 64).

#### 4. Discussion – Conclusions

1) L'analyse quantitative de la déformation et l'étude des mécanismes de la déformation ont montré un changement progressif depuis le front (Médiannes Plastiques) vers l'arrière de la nappe (Médiannes Rigides). Dans les Médiannes Plastiques la déformation des pellets est faible et les grains de calcite ne sont que peu maclés. Dans cette région la déformation semble surtout s'accomoder par dissolution – cristallisation. Le style de déformation peut être comparé à celui observé par DROXLER & SCHAEER (1979) dans les calcaires du Jura (Suisse), par ENGELDER & LOWRIE (1976) dans les calcaires d'Umbria (Italie du Nord), par GROSHONG et al. (1984a) dans les calcaires des nappes Glaronnaises supérieures de Suisse orientale, ou par KILSDONK & WILTSCHKO (1988) dans les calcaires du Tennessee Pine Mountain (Appalaches, USA). Dans les Médiannes Rigides, les pellets sont fortement étirés et le maclage de la calcite devient très important (plus de 16% de déformation). L'extinction onduleuse des grains de calcite, les macles courbes et maclées, la recristallisation dans les macles de la calcite et la recristallisation dynamique par migration aux joints de grains dans les grains de calcite (SCHMID, comm. orale concernant des échantillons de Trias pris à proximité du chevauchement basal des Médiannes Rigides à la Gummfluh) sont ici autant d'indicateurs de mécanismes de déformation intragranulaire.

Ce changement dans l'intensité de déformation accompagne le changement structural du front jusqu'à l'arrière des Préalpes médianes (on passe de plis failles à des écailles tectoniques) et se fait parallèlement à l'augmentation du métamorphisme qui passe de la diagenèse dans la zone frontale à l'épizone dans la zone arrière (MOSAR 1988b). Le relais de la dominance des mécanismes de déformation transgranulaires par des mécanismes de déformation intragranulaires coïncide avec le passage anchi-zone – épizone, soit environ vers 300 °C (Tableau III, fig. 6).

2) Dans les Médiannes Plastiques l'étude des EDF coupés perpendiculairement aux axes régionaux des plis révèle que le raccourcissement se fait plus ou moins parallèlement à la stratification. Ces orientations sont celles auxquelles on s'attend si les plis sont formés par compression longitudinale, ainsi que l'a montré DIETERICH (1970) par des modèles sur ordinateur. L'analyse tridimensionnelle montre que si cette explication est en partie justifiée, il y a cependant un certain nombre de cas où le plan d'aplatissement (xy) n'est pas parallèle à l'axe régional des plis. Il est en effet fort probable que la distribution locale des contraintes puisse présenter des différences notables avec le champ régional et soit liée à des structures tectoniques locales (p.ex. des failles). De plus le fort pourcentage de N.E.V. dans le maclage de la calcite suggère une histoire de déformation complexe, non-coaxiale. Nous pensons qu'une partie du maclage de la calcite résulterait d'un aplatissement ultime des plis, expliquant les fort % de N.E.V. et les joints stylolithiques parallèles aux plans axiaux dans les cœurs des plis. Cette hypo-

thèse est renforcée par l'observation que la majorité des plis dans les Médiannes Plastiques appartiennent aux classes 1C, 2 et 3, mais sont tous très proches des plis du type similaire (classe 2; MOSAR 1988a). C'est vers ce type que convergent les plis des différentes classes lorsqu'ils sont soumis à un aplatissement (RAMSAY 1967).

3) Dans les Médiannes Rigides, c'est la distance normale aux chevauchements qui semble déterminer l'orientation de l'EDF. Dans la partie supérieure de la nappe, c'est le chevauchement des nappes de la Simme et de la Brèche qui provoque un cisaillement important. L'extension parallèle au plan de chevauchement de la nappe de la Brèche pourrait matérialiser la direction de mouvement sur ce plan (variant de E-W à S-N). Le même phénomène semble se produire à la base de l'écaille principale des Médiannes Rigides (fig. 2 et fig. 10). Les plans de chevauchements ne constituent cependant pas des surfaces planes, mais ils sont gauchis (MOSAR 1988a). Les variations de l'orientation de la stratification, subparallèle aux chevauchements (fig. 10), reflètent ces courbures. Ce sont ces variations qu'on peut invoquer afin d'expliquer les différentes directions d'extension observées dans la partie supérieure de la nappe.

Nous suggérons que l'écaille des Médiannes Rigides est prise en cisaillement entre le chevauchement basal des Préalpes médianes et celui de la nappe de la Brèche. Ce cisaillement entraîne une déformation plus intense et une orientation des allongements des EDF parallèles à la direction de transport (sens du cisaillement) dans les roches à proximité du chevauchement. Au centre de l'écaille par contre l'orientation de l'EDF pourrait refléter un clivage schisteux naissant, perpendiculaire à la stratification (analogue aux Médiannes Plastiques). Le passage progressif de la nappe sur une rampe créerait un, voire deux clivages schisteux successifs (SANDERSON 1982). La complexité de la superposition de ces événements est illustrée par la juxtaposition dans des veines et dans la matrice de grains de calcite faiblement maclés, de grains avec des macles courbes et des macles maclées et de grains avec de la recristallisation dynamique. De même le fort % de N.E.V. suggère une déformation complexe rotationnelle qui peut s'intégrer dans un modèle avec cisaillement.

4) Si la déformation interne des Préalpes médianes est le résultat d'une compression générale de ses niveaux sédimentaires, son expression et son histoire ne sont pas les mêmes dans les Médiannes Plastiques et les Médiannes Rigides. Dans les premières cette déformation est associée au plissement. Elle s'est faite après la mise en place de la nappe Supérieure sur les Médiannes Plastiques, car on sait que le chevauchement basal de la nappe Supérieure est replissé avec les plis des Médiannes Plastiques. Dans les Médiannes Rigides nous pensons qu'une première partie de la déformation résulte de la mise en place de la nappe de la Brèche, qui elle supporte la nappe Supérieure, sur les Médiannes Rigides. Une prochaine «phase» de la déformation intervient lors de la formation d'une rampe et de paliers de chevauchement dans les Médiannes Rigides. Ce sont les mouvements sur ce plan de chevauchement qui occasionneraient un bombement et faillage du chevauchement basal de la nappe de la Brèche (MOSAR 1988a).

La déformation se fait donc de manière diachrone depuis les Médiannes Rigides (depuis l'arrivée de la nappe de la Brèche et de la nappe Supérieure) vers les Médiannes Plastiques (après l'arrivée de la nappe Supérieure). L'intime association entre la déformation interne et le métamorphisme et le fait que ce dernier est transporté (MOSAR 1988a, b) nous amène à dire que la déformation est précoce, c'est-à-dire antérieure au transport des Préalpes médianes par dessus les nappes Helvétiques.

5) Si à nos yeux la structure, la déformation et le métamorphisme des Préalpes médianes sont ainsi le résultat d'un événement tectono-métamorphique diachrone précoce, il faut noter que d'autres approches, notamment celle de PLANCHEREL (1979), conçoivent qu'une partie, voire toute, la déformation, au moins dans les Médianes Plastiques, est post-emplacemement (d'âge mio-pliocène). Des études sur la géométrie et la cinématique des plis-failles dans les Médianes Plastiques, actuellement en cours, semblent en effet indiquer que le style tectonique actuel peut, au moins partiellement, s'expliquer par la formation et l'activité par exemple de failles et rampes tectoniques dans le soubassement des Préalpes (molasse et/ou socle).

Alors que dans l'interprétation de nos résultats sur le métamorphisme (MOSAR 1988b) le passage diagenèse-épizone entre Médianes Plastiques et Rigides est considéré comme continu et progressif, des conclusions différentes sur la chronologie de la structuration s'imposent évidemment si on admet qu'il ne s'agit pas d'un gradient, mais d'un saut brusque. Notamment la structuration des Médianes Plastiques et celle des Médianes Rigides pourraient alors constituer deux événements différents.

*(Des tableaux avec l'ensemble des données sur la déformation interne peuvent être obtenus par demande à l'auteur de l'article).*

## Remerciements

J'aimerais témoigner ma reconnaissance à M.J.P. Schaer, qui est à l'origine de ce travail, MM.M. Burkhard, J.C. Hunziker, B. Kübler, F. Persoz, A. Pfiffner, R. Plancherel et S. Schmid pour leur aide et leurs nombreux conseils. Ce travail a pu être réalisé grâce au soutien financier du Fonds national Suisse (requête FN n°2.837-0.85) et de l'Université de Neuchâtel, je leur témoigne ma gratitude.

## BIBLIOGRAPHIE

- BAUD, A. 1972: Observations et hypothèses sur la géologie de la partie radicale des Préalpes médianes. *Eclogae géol. Helv.* 65/1, 43–55.
- BAUD, A. & SEPTFONTAINE, M. 1980: Présentation d'un profil palinspastique de la nappe des Préalpes médianes en Suisse occidentale. *Eclogae géol. Helv.* 73/2, 651–660.
- BIERI, P. 1925: Der Bau der Klippendecke zwischen Gantrisch und Simmental (Berner Oberland). *Jb. phil. Fak. II Univ. Bern* 5, 89–109.
- BORRADAILE, G.J. 1987: Analysis of strained sedimentary fabrics: a review and tests. *Can. J. Earth Sci.* 24, 442–455.
- BURKHARD, M. 1986a: Déformation des calcaires de l'Helvétique de la Suisse occidentale (Phénomènes, mécanismes et interprétation tectoniques). *Rev. géol. dyn. géograph. phys.* 27/5, 281–301.
- 1986b: L'Helvétique de la bordure occidentale du Massif de l'Aar. Thèse de doctorat Univ. Neuchâtel, inédit.
- 1988: L'Helvétique de la bordure occidentale du massif de l'Aar (évolution tectonique et métamorphique). *Eclogae geol. Helv.* 81/1, 63–114.
- CARON, Ch. 1972: La nappe supérieure de Préalpes: subdivisions et principaux caractères du sommet de l'édifice préalpin. *Eclogae geol. Helv.* 65/1, 47–73.
- 1973: Survol géologique des Alpes occidentales. *Bull. Soc. Frib. Sc. Nat.* 62/2, 73–81.
- CLOOS, E. 1947: Oolite deformation in the South Mountain Fold, Maryland. *Bull. Geol. Soc. Am.* 58, 843–918.
- DIETERICH, H.J. 1970: Computer experiments on mechanics of finite amplitude folds. *Can. J. Earth Sci.* 7, 467–476.
- DROXLER, A. & SCHAER, J.P. 1979: Déformation cataclastique plastique lors du plissement sous faible couverture de strates calcaires. *Eclogae geol. Helv.* 72/2, 551–570.
- DUNNET, D. 1969: A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics* 7/2, 117–136.
- DUNNET, D. & SIDDANS, A.W.B. 1971: Non-random sedimentary fabrics and their modification by strain. *Tectonophysics* 12, 307–325.
- ELLIOTT, D. 1970: Determination of finite strain and initial shape from deformed elliptical objects. *Bull. Geol. Soc. am.* 81, 2221–2236.

- ENGELDER, T.W.A. & LOWRIE, W. 1976: Formation of spaced cleavage and folds in brittle limestone by dissolution. *Geology* 4, 698–701.
- FREY, M. 1986: Very low-grade metamorphism of the Alps- an introduction. *Schweiz. mineral. petrogr. Mitt.* 66, 13–27.
- FRIEDMANN, M., TEUFEL, L.W. & MORSE, J.D. 1976: Strain and stress analysis from calcite twin lamellae in experimental buckles and faulted drape-folds. *Phil. Trans. R. Soc. London, A* 283, 87–197.
- FRY, N. 1979a: Random point distributions and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* 60, 89–105.
- 1979b: Density distribution techniques and strained length methods for determination of finite strain. *J. Struct. Geol.* 1/3, 221–229.
- GRATIER, J.P. 1983: Estimation of volume changes by comparative chemical changes in heterogeneously deformed rocks (folds with mass transfer). *J. Struct. Geol.* 5, 329–339.
- 1984: La déformation des roches par dissolution-cristallisation. Thèse d'état, Univ. Grenoble, inédit.
- GRIGGS, D.T. 1953: Deformation of Yule marble. *Bull. Geol. Soc. Am.* 64, 1385–1406.
- GROSHONG, R.H. 1972: Strain calculated from twinning in calcite. *Bull. geol. Soc. Amer.* 82, 2025–2038.
- 1974: Experimental test of least-squares strain gage calculations using twinned calcite. *Bull. geol. Soc. Amer.* 85, 1855–1864.
- GROSHONG, R.H., PFIFFNER, O.A. & PRINGLE, L. 1984a: Strain partitioning in the Helvetic thrust belt of eastern Switzerland from the leading edge to the internal zone. *J. struct. Geol.* 61/1–2, 5–18.
- GROSHONG, R.H., TEUFEL, L.W. & GASTEIGER, C. 1984b: Precision and accuracy of calcite strain-gage technique. *Bull. Geol. Soc. Am.* 95, 357–363.
- HANNA, S.S. & FRY, N. 1979: A comparison of methods of strain determination in rocks from southwest Dyfed (Pembrokeshire) and adjacent areas. *J. Struct. Geol.* 1/2, 155–162.
- HOSSACK, J.R. 1968: Pebble deformation and thrusting in Bydgin area (Southern Norway). *Tectonophysics* 5/4, 315–339.
- HSÜ, T.C. 1966: The characteristics of coaxial and non-coaxial strain paths. *J. Strain Anal.* 1, 216–222.
- HUNZIKER, J., BAUD, A., HUON, S., KÜBLER, B., MASSON, H., MOSAR, J. & SCHMID, S. 1987: Datations du métamorphisme transporté dans les Préalpes médianes: données minéralogiques et isotopiques K-Ar et Rb-Sr. Abstract et poster à la 5e Réunion du Groupe Tectonique Suisse, Fribourg, 5/6 Décembre, 1987.
- JEANNET, A. 1922: Das romanische Deckengebirge, Préalpes und Klippen. In: HEIM, A.: *Geologie der Schweiz*, Bd. II/2, 589–676, ed. Tauschniz, Leipzig.
- KILSDONK, B. & WILTSCHKO, D.V. 1988: Deformation mechanisms in the southeastern ramp region of the Pine Mountain block, Tennessee. *Bull. Geol. Soc. Am.* 100, 653–664.
- LAURENT, Ph., BERNARD, Ph., VASSEUR, G. & ETCHECOPAR, A. 1981: Stress tensor determination from the study of e-twins in calcite. *Tectonophysics* 78/1, 651–660.
- LISLE, R.J. 1977a: Clastic grain shape and orientation in relation to cleavage from the Albersystwyth grits, Wales. *Tectonophysics* 39, 381–397.
- 1977b: Estimation of the tectonic strain ratio from the mean shape of deformed elliptical markers. *Geol. Mijnbouw* 56/2, 140–144.
- 1985: *Geological strain analysis. A manual for the Rf/Ø technique.* Pergamon Press.
- LODE, W. 1926: Versuche über den Einfluss der mittleren Hauptspannung auf das Fließen der Metalle Eisen, Kupfer und Nickel. *Z. Physik.* 36, 189–201.
- LUGEON, M. & GAGNEBIN, E. 1941: Observations et vues nouvelles sur la géologie des Préalpes romandes. *Bull. lab. géol. minéral. géophys. Univ. Lausanne*, n° 72.
- MCCLAY, K.R. 1977: Pressure solution and coble creep in rocks and minerals: a review. *J. Geol. Soc. London*, 134, 57–70.
- MOSAR, J. 1988a: Structures, déformation et métamorphisme dans les Préalpes Romandes (suisse). Thèse de Doctorat ès sciences, Université de Neuchâtel.
- 1988b: Métamorphisme transporté dans les Préalpes. *Bull. Suisse Minéral. Pétrogr.* 68/1, 77–94.
- (en prép.): *Géologie structurale des Préalpes médianes (Suisse).*
- NADAÏ, A. 1963: *Theory of flow and fracture of solids.* Engen. Soc. Monogr., McGraw-Hill, New-York.
- NICOL, G. 1956: *Geologie der östlichen Stockhorn-Kette (Berner Oberland).* *Mitt. natf. Ges. Bern*, N.F. 13, 53–243.
- PATERSON, S.R. 1983: A comparison of methods used in measuring finite strains from ellisoidal objects. *J. Struct. Geol.* 5/6, 611–618.
- PEACH, C.J. & LISLE, R.J. 1979: A Fortran IV program for the analysis of tectonic strain using deformed elliptical markers. *Computers in Geoscience* 5, 325–334.
- PFIFFNER, O.A. 1986a: Le programme Strell et Ellipse. *Cahiers de l'Inst. Géol. Neuchâtel, Série T*, 8.

- 1986b: Determination of strain in any directions from the strain ellipsoid. Cahiers de l'Inst. Géol. Neuchâtel, Série T, 9.
- 1986c: Le programme RFPHI. Cahiers de l'Inst. Géol. Neuchâtel, Série T, 4.
- PIFFNER, O.A. & BURKHARD, M. 1987: Determination of paleo-stress axes orientations from fault, twin and earthquake data. *Ann. Tectonicae* 1/1, 48–57.
- PLANCHEREL, R. 1976: Essai d'interprétation de la dislocation transversale Bellegarde-Lac Noir (Préalpes médianes Fribourgeoises). *Eclogae geol. Helv.* 69/2, 461–469.
- 1979: Aspects de la déformation en grand dans les Préalpes médianes plastiques entre Rhône et Aar. *Eclogae geol. Helv.* 72/1, 145–214.
- PLANCHEREL, R. & WEIDMANN, M. 1972: La zone anticlinale de la Tinière (Préalpes médianes vaudoises). *Eclogae geol. Helv.* 65/1, 75–91.
- RAMSAY, J.G. 1967: *Folding and fracturing of rocks*. McGraw-Hill, New-York.
- RAMSAY, J.G. & HUBER, I.M. 1983, 1987: *The techniques of modern structural geology*, volume 1 & 2 Ed. Academic Press.
- ROBERTS, B & SIDDANS, A.W.B. 1971: Fabric studies in the Llwyd Mawr ignimbrite, Caernarvonshire, North Wales. *Tectonophysics* 12, 283–306.
- ROBIN, P.-Y.F. 1979: Theory of metamorphic segregation and related processes. *Geochem. Cosmochim. Acta* GBR, 43/10, 1587–1600.
- ROBIN, P.-Y.F. & TORRANCE, J.G. 1987: Statistical analysis of the effect of sample size on paleostrain calculation. I. single face measurements. *Tectonophysics* 138, 311–317.
- RUTTER, E.H. 1983: Pressure solution in nature, theory and experiment. *J. Geol. Soc. London* 140, 725–740.
- SANDERSON, D.J. 1982: Models of strain variation in nappes and thrust sheets: a review. *Tectonophysics* 88, 201–233.
- SCHARDT, H. 1884: Etudes géologiques sur le Pays-d'Enhaut Vaudois. *Bull. Soc. vaud. Sc. nat.* 20/90.
- SCHMID, S.M. 1982: Laboratory experiments on rheology and deformation mechanisms in calcite rocks and their application to studies in the field. *Mitt. Geol. Inst. ETH Univ. Zürich*, N.F. 241.
- SCHMID, S.M., PANOZZO, R. & BAUER, S. 1987: Simple shear experiments on calcite rocks: rheology and micro-fabric. *J. Struct. Geol.* 9, 5/6, 747–778.
- SIDDANS, A.W.B. 1971: Non-random sedimentary fabrics: their modifications by strain. *Tectonophysics* 12, 307–325.
- 1972: Slaty cleavage – a review of research since 1815. *Earth Sci. Rev.* 8, 205–232.
- SPANG, J.H. 1972: Numerical method for dynamic analysis of calcite twin lamella. *Bull. Geol. Soc. Am.* 83, 467–472.
- SUPPE, J. 1985: *Principles of structural Geology*. Ed. Prentice-Hall, Inc. New-Jersey.
- TEUFEL, L.W. 1980: Strain analysis of experimentally superposed deformation using calcite twin lamellae. *Tectonophysics* 65, 291–309.
- TOBISH, O.T., FISKE, R.S., SACKS, S. & TANIGUCHI, D. 1977: Strain in metamorphosed volcanoclastic rocks and its bearing on the evolution of orogenic belts. *Bull. Geol. Soc. Am.* 88, 23–40.
- TRÜMPY, R. 1980: *Geology of Switzerland: a guide-book*, part A. Ed.: Schweiz. Geol. Kommission.
- TURNER, F. 1953: Nature and dynamic interpretation of deformation lamellae in calcite of three marbles. *Am. J. Sci.* 251, 276–298.
- TURNER, F., GRIGGS, D.T. & HEARD, H. 1954: Experimental deformation of calcite crystals. *Bull. Geol. Soc. Am.* 65, 9, 883–934.
- TURNER, F. & WEISS, L. 1963: *Structural analyses of metamorphic tectonites*. Intern. serie Earth Sci. McGraw Hill, New York.
- UMIKER, R. 1952: *Geologie der westlichen Stockhornkette (Berner Oberland)*. Diss. Univ. Bern.
- WATTERSON, J. 1968: Homogeneous deformation of the gneisses of Vesterland, South West Greenland. *Medd. Gronland* 175/6, 272.
- WENK, H.R. 1985: *Preferred orientation in deformed metals and rocks: An introduction to modern texture analysis*. Academic press, Orlando.

Manuscript received 8 September 1988

Revision accepted 8 February 1989

