

## Déformations et changement de volume dans un marbre à stylolithes de la région de Rabat (Maroc)

par JEAN-PIERRE GRATIER \*

**Résumé.** — Mise en évidence du changement de volume consécutif à la déformation d'un calcaire récifal dévonien de la région de Rabat. Les marqueurs de déformation discontinue à l'échelle de l'affleurement (fentes à calcite et plans stylolithiques) donnent les valeurs principales de la déformation. Les marqueurs de déformation continue (Brachiopodes) donnent la forme et la situation de l'ellipsoïde. Deux contractions successives de directions orthogonales sont définies : la première est perpendiculaire à la stratification, elle est soulignée par des plans stylolithiques ; la seconde est perpendiculaire à une deuxième famille de plans stylolithiques assimilable à une « schistosité de dissolution ». La diminution de volume est liée aux deux contractions : compte tenu de la dissolution dans les plans de stylolithes et des recristallisations dans les fentes à calcite elle est estimée au moins à 26 % par rapport au volume initial.

**Abstract.** — After deformation in a devonian recifal limestone outcropping near Rabat (Moroco), appears a volume change. The markers of the « discontinuous deformation » at the outcrop scale (calcite tension fissures and stylolites) give the principal value of the deformation. The markers of the « continuous deformation » (distortion of the Brachiopods) give the shape and the orientation of the strain ellipsoid. Two successive contractions with orthogonal direction can be defined : the first one is perpendicular to the stratification (underlined by stylolites), the second is perpendicular to another lot of stylolites which are compared to a « dissolution cleavage ». The volume diminution is related to these two contractions : with the dissolution in the stylolites and the recrystallisation in the calcite veins the volume decrease is about 26 %.

La déformation d'un corps peut se décomposer en plusieurs transformations élémentaires : translation, rotation, déformation interne. Celle-ci est définie comme la modification des distances mutuelles des différents points de ce corps (dict. de rhéologie 1972). Une des meilleures façons de visualiser la déformation est de considérer une sphère de rayon unité, incluse dans le matériau non déformé, et sa modification après une déformation homogène : on obtient un ellipsoïde dit ellipsoïde des déformations finies, qui se caractérise par trois axes principaux X, Y, Z [Vialon *et al.*, 1976].

On considère généralement que le volume de la sphère et de l'ellipsoïde restent constants pendant la déformation, c'est-à-dire que la déformation interne s'effectue sans changement de volume. C'est une simplification qui n'est probablement pas toujours exacte, comme le montre l'exemple suivant, pris dans des marbres à stylolithes de la région de Rabat. Ramsay et Wood [1973] ont étudié les effets géométriques d'un changement de volume sur la forme de l'ellipsoïde des déformations finies. Mais pour montrer le changement de volume, considérer la forme de l'ellipsoïde n'est pas suffisant, parce

celle-ci ne dépend généralement pas des valeurs principales réelles selon les trois directions, mais de leurs rapports dans trois plans orthogonaux.

Dans l'exemple suivant, le changement de volume a pu être mis en évidence en utilisant des marqueurs de déformation discontinue (à l'échelle de l'affleurement) : fentes à calcite et plans de stylolithes, qui donnent réellement des valeurs principales. Par contre, entre ces plans de discontinuité, on trouve des marqueurs de déformation continue (Brachiopodes déformés) qui ne donnent que la forme de l'ellipsoïde. Dans ce cas n'ayant pas de valeurs principales réelles, on ne peut que faire des comparaisons avec les marqueurs de déformation discontinue.

Les mesures ont été effectuées dans des carrières de calcaire exploité pour marbre, dont les parements de découpe sont parallèles aux axes X, Y, Z de la déformation finie.

\* I.R.I.G.M. (Inst. de recherches interdisciplinaires de géologie et mécanique) et Inst. Dolomieu, U.S.M.G., B. P. 53, 38041 Grenoble Cedex.

Note présentée le 15 mars 1976, manuscrit définitif reçu le 26 août 1976.

## DESCRIPTION SOMMAIRE DES STRUCTURES GÉOLOGIQUES.

Une carte géologique (fig. 1) montre les structures de la région Rabat-Casablanca appartenant au pla-

teau central marocain. Cette région est affectée par plusieurs déformations importantes d'âge primaire (essentiellement hercynienne) et par des déformations d'âge secondaire et tertiaire plus réduites [Destombes et Jeannette, 1965].

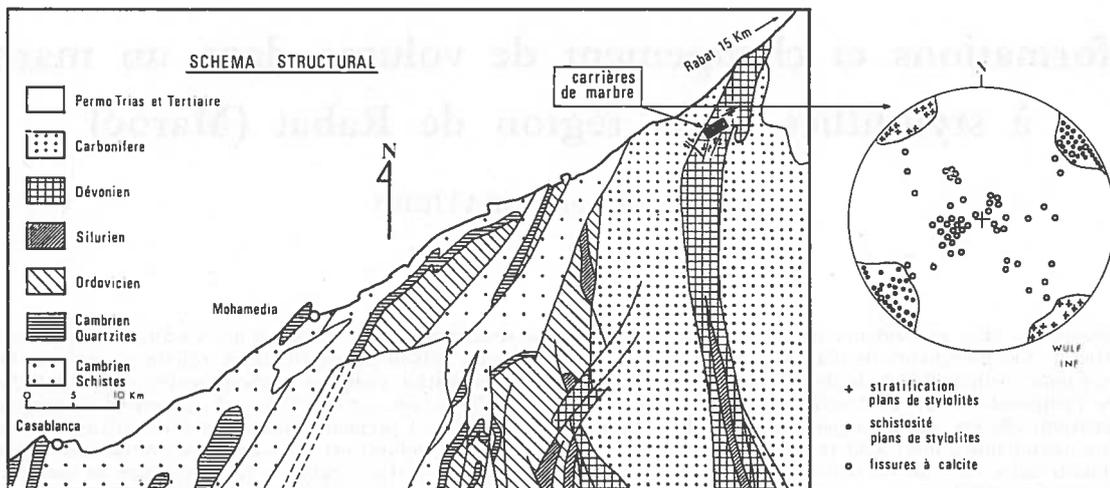


FIG. 1. — Schéma structural de la région côtière comprise entre Rabat et Casablanca, et situation des carrières de marbre du Dévonien (Givétien). A droite, diagramme stéréographique montrant l'altitude des trois principales structures planaires dans ces carrières. Coord. Lamb. des carrières :  $x = 351,2$  ;  $y = 366$  ; carte Bouznika 1/50 000.

Les anticlinaux et les synclinaux, relativement peu accusés dans les régions sud et sud-ouest ont des directions convergentes vers la partie nord-est de la carte. Dans cette partie nord-est les couches sont redressées et écrasées. De grands plans de dislocations Nord-Sud se conjuguent avec des plans NE-SW. Les études stratigraphiques montrent des mouvements verticaux importants le long de ces failles (1 000 à 1 500 m), mais aussi des serrages est-ouest qui se traduisent par des chevauchements horizontaux avec une flèche de plus de 800 m.

Les calcaires gris foncé du Dévonien sont d'origine récifale avec des Stromatopores, des Polypiers et des Brachiopodes. Ils constituent une sorte de horst au milieu des quartzites et des schistes du Carbonifère. Ils sont limités par des plans de failles Nord-Sud et NE-SW à mouvements verticaux et horizontaux qui découpent ainsi des amandes. La partie exploitée par les carrières constitue une de ces amandes, de 400 m de long et de 100 m de large.

Les grandes failles traduisent déjà une partie de la déformation (translation et peut-être rotation) mais cette partie n'a pas été évaluée. On n'a considéré dans cet exemple que les structures situées à l'intérieur de l'amande : elles ne représentent donc que la déformation interne, et les directions de déformation ainsi mises en évidence ne peuvent pas être étendues directement à l'ensemble de la région.

Pour découper leurs blocs au fil, les carrières suivent les deux directions de discontinuité les plus importantes (diagramme fig. 1) : — l'une NE-SW est la stratification et ces plans sont aussi des plans de stylolithes ; — l'autre NW-SE est due à de très nombreux plans de stylolithes, tellement denses qu'ils sont assimilables pratiquement à une schistosité. C'est ainsi qu'ils seront désignés dans cet exemple, pour les différencier des précédents.

Ce sont ces deux familles de plans verticaux qui limitent les blocs de la figure 2. Ces plans contiennent les trois axes principaux de la déformation finie X.Y.Z.

— Le plan de schistosité est le plan d'aplatissement le plus important, il est perpendiculaire à Z (et contient XY).

— Le plan de stratification est un plan d'aplatissement moins important, il est perpendiculaire à Y (et contient XZ).

— Le troisième plan, horizontal contient ZY.

On note d'autres structures associées qui sont des fissures à calcite fréquemment en échelon et traduisant donc des plans de cisaillement. Ces derniers sont souvent conjugués, comme on peut le voir dans la figure 2, et ils peuvent même évoluer localement en plans de faille, mais ceux-ci s'amortissent très rapidement.

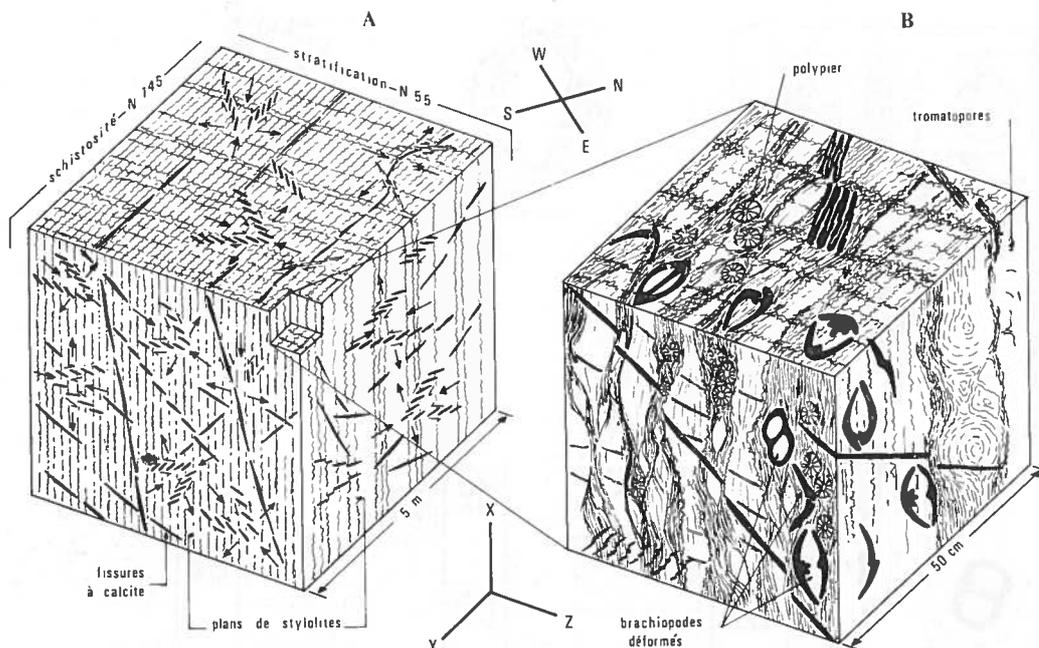


Fig. 2. — Blocs de marbre vus à l'échelle des carrières (2A) et à l'échelle de l'affleurement (2B), montrant les différents marqueurs de la déformation.

Les remplissages de calcite sub-parallèles à la schistosité sont aplatis alors que ceux, plus rares, sub-parallèles à la stratification sont aplatis et plissés, ce qui tendrait à montrer que les plans de stylolithes dits « schistosité » sont postérieurs aux plans de stylolithes parallèles à la stratification. Cela s'ajoute au fait que la grande régularité directionnelle des deux familles de plans de stylolithes exclut une contraction simultanée dans plusieurs directions horizontales.

Pour évaluer le changement de volume, la déformation a été quantifiée dans les trois plans orthogonaux à X, Y, Z. Trois types de marqueurs sont utilisables dans cet exemple :

— Des marqueurs de déformation continue : des fossiles Brachiopodes du genre *Stringocephalus* [Lecointre, 1926] qui sont déformés avec la matrice calcaire.

— Des marqueurs de déformation discontinue à l'échelle de l'affleurement : les fentes à calcite blanche qui apparaissent nettement sur le calcaire gris foncé et qui traduisent un allongement perpendiculaire à leur plan ; les plans de stylolithes qui, au contraire, sont soulignés par des accumulations de matières noires insolubles et qui traduisent une contraction parallèle aux pics stylolithiques [Arthaud et Mattauer, 1969].

A l'échelle des carrières, les trois types de marqueurs peuvent être considérés comme indiquant une déformation continue et homogène.

MARQUEURS DE DÉFORMATION CONTINUE (À L'ÉCHELLE DE L'AFFLEUREMENT).

#### Les Brachiopodes déformés.

*Méthodes de mesure.* Ramsay [1967] donne de nombreux exemples de calcul de déformation à l'aide des fossiles déformés. Dans notre cas, les *Stringocephalus* ont une forme originelle à peu près ellipsoïdale, avec symétrie bilatérale. Ces Brachiopodes apparaissent sur les parements de découpe selon trois aspects : coupe transversale, coupe horizontale et coupe sagittale. Les formes originelles de ces fossiles sont esquissées dans la figure 3A d'après les descriptions paléontologiques du genre.

Les coupes transversales permettent une étude de la modification de l'angle droit originel entre appareil brachial et plan de fermeture des valves. Elles sont surtout abondantes sur le parement N 55 vertical et il y en a quelques-unes sur le parement N 145 vertical. L'utilisation de la méthode de Wellman [Ramsay, 1967, p. 242] permet de dessiner l'ellipse des déformations pour les deux parements (fig. 3C). Le grand axe de l'ellipse est parallèle aux plans de stylolithes.

En outre, toutes les coupes ont également été utilisées en mesurant : — d'une part le rapport entre « grandes » et « petites » longueurs des fossiles (les termes « grands » et « petits » étant relatifs à la forme originelle) ; — d'autre part l'attitude de la ligne de plus grande longueur originelle (ligne de fermeture

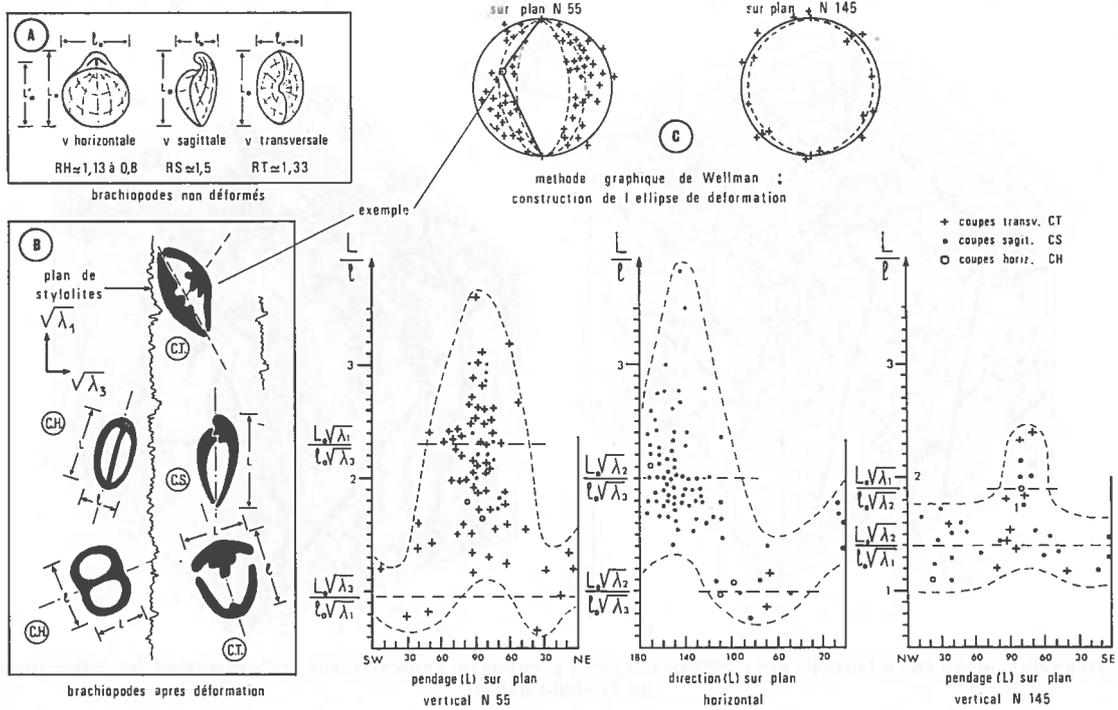


FIG. 3. — Mesure de la déformation sur des *Stringocephalus* déformés.

3A : ces Brachiopodes non déformés dessinés d'après les descriptions paléontologiques du genre ; 3B : les mêmes fossiles en coupe après déformation, tels qu'ils apparaissent sur les trois parements de découpe,  $L/l$  = « Grande » longueur sur « petite » longueur ; 3C : construction de l'ellipse de déformation en utilisant la méthode graphique de Wellman. Un exemple est pris dans la figure 3B ; 3D : report des mesures du rapport  $L/l$  défini dans la figure 3B, en fonction de l'attitude de la ligne  $L$  ;  $\sqrt{\lambda} = L/L_0$  = longueur actuelle sur longueur initiale.

des valves pour les C.T. et C.S. et appareil brachial pour les C.H.).

Remarques : l'exploitation des carrières ayant été suivie régulièrement pendant plus d'un an, seules les coupes bien caractéristiques ont été mesurées. Pour les coupes horizontales, le rapport originel est différent suivant les deux valves, ce qui explique que ce type de coupe ait été souvent négligé.

**Interprétation.** Les Brachiopodes se comportent comme des matériaux relativement plus rigides que la matrice calcaire, ils traduisent donc une déformation minimale. Les diagrammes montrent une assez grande dispersion des mesures, aussi bien pour la modification de l'angle droit que pour le rapport de la « grande » longueur sur la « petite » longueur. Cela peut s'expliquer de trois façons :

— Soit parce que le rapport  $L_0/l_0$  initial est variable, mais ce n'est pas le cas puisque la dispersion est réduite sur le plan N 145.

— Soit parce que la compétence de la matrice et des fossiles n'est pas constante.

— Soit parce que l'intensité de la déformation est localement variable et que certains fossiles situés dans des zones de grande densité de plans de stylolites

sont plus aplatis que d'autres, situés dans des zones de moindre densité de ces plans.

Les deux dernières explications peuvent être invoquées simultanément puisque la compétence de la matrice va changer selon la quantité de matières noires insolubles.

Si on veut évaluer une quantité de déformation moyenne représentative à l'échelle de toutes les carrières, il faut utiliser les valeurs moyennes données par les fossiles.

Avec la méthode de Wellman (fig. 3C) on obtient un rapport  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_3} = 1,67$  pour le parement N 55 et  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_2} = 1,14$  pour le parement N 145 (par convention  $\sqrt{\lambda_1}, \sqrt{\lambda_2}, \sqrt{\lambda_3}$ , représenteront la quantité de déformation :

$$\frac{L}{L_0} = \frac{\text{longueur actuelle}}{\text{longueur initiale}}$$

suivant les axes X.Y.Z, respectivement.

Avec les diagrammes  $L/l$  en fonction de l'attitude de  $L$  : la moyenne des mesures  $L/l$  avec  $L$  parallèle au plan de stylolites, représente le rapport

$$\frac{L_0 \sqrt{\lambda_1}}{l_0 \sqrt{\lambda_2}}$$

et la moyenne des mesures de  $L/l$  avec  $L$  perpendiculaires au plan de stylolithes représente :

$$\frac{L_0 \sqrt{\lambda_2}}{l_0 \sqrt{\lambda_1}}$$

La valeur  $\lambda_1/\lambda_2$  se calcule aisément en faisant le rapport de ces deux données (en multipliant ces deux données on retrouverait le rapport initial  $(L_0/l_0)^2$ ).

Sur le parement N 55 :  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_3} = 1,56$  ; sur le parement N 145 :  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_3} = 1,16$  ; sur le parement horizontal  $\sqrt{\lambda_2}/\sqrt{\lambda_3} = 1,41$ .

Les rapports  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_3}$ ,  $\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_2}$ ,  $\sqrt{\lambda_2}/\sqrt{\lambda_3}$ , doivent être compatibles pour former un ellipsoïde (le rapport des extrêmes est égal au moyen).

En tenant compte de cette nécessité et des deux méthodes utilisées, les valeurs les plus satisfaisantes sont les suivantes :

$$\sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_3} = 1,61 ; \quad \sqrt{\lambda_1}/\sqrt{\lambda_2} = 1,15 ; \quad \sqrt{\lambda_2}/\sqrt{\lambda_3} = 1,40.$$

La forme de l'ellipsoïde ne suffit pas pour connaître le changement de volume. Il faudrait, en plus, dis-

poser d'au moins une valeur principale, mesurée bien sûr à la même échelle que celle des fossiles. Cela n'est pas possible dans les carrières.

On peut cependant toujours calculer les trois valeurs principales en admettant que le volume soit resté constant, et comparer ces valeurs avec les indications données par les autres marqueurs de la déformation, pour voir si ces derniers confirment ou non la constance du volume. Dans l'hypothèse d'une conservation du volume pendant la déformation interne, le volume de la sphère est égal au volume de l'ellipsoïde  $\sqrt{\lambda_1} \times \sqrt{\lambda_2} \times \sqrt{\lambda_3} = 1$  d'où  $\sqrt{\lambda_1} = 1,23$  ;  $\sqrt{\lambda_2} = 1,07$  ;  $\sqrt{\lambda_3} = 0,76$ . On constate que  $\sqrt{\lambda_2}$  apparaît ainsi comme une direction d'allongement, alors qu'en réalité c'est une direction de contraction (Y est perpendiculaire à des plans de stylolithes et de stratification). Cela peut s'expliquer si les deux contractions (perpendiculaires respectivement à la stratification et à la schistosité) ne sont pas contemporaines ce qui a déjà été envisagé dans les premières observations. On peut par exemple imaginer la succession décrite dans la figure 4, toujours avec l'hypothèse de conservation de volume.

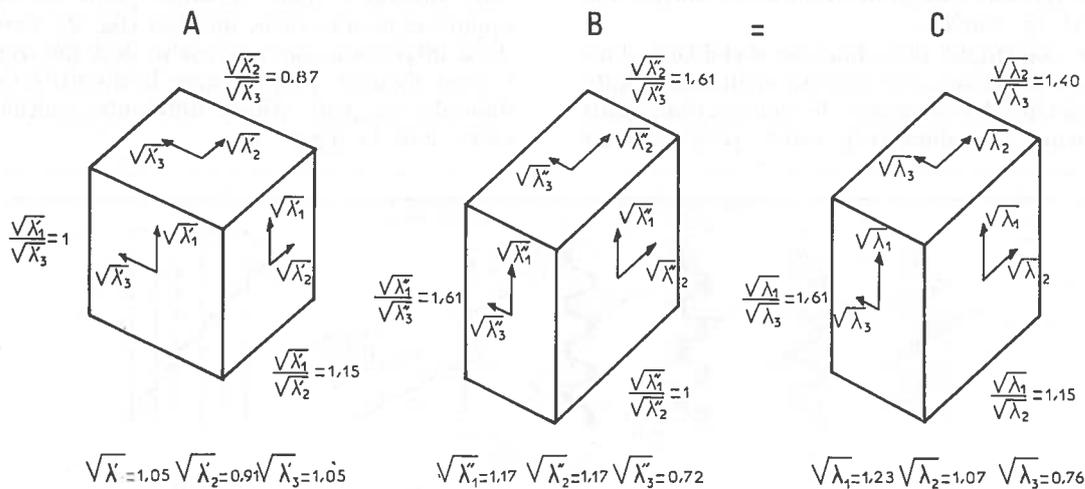


FIG. 4. — Décomposition de la déformation continue finie en deux déformations successives en supposant que le volume reste constant.

4A : contraction perpendiculaire à la stratification ; 4B : contraction perpendiculaire à la schistosité ; 4C : déformation continue finie.

Dans cette succession de deux déformations, il doit y avoir une faible extension dans le plan de stratification  $\sqrt{\lambda_1}' = \sqrt{\lambda_3}' = 1,05$  lors de la première déformation, ce qui est compatible avec les observations, puisque dans la figure 2 on note des plans de calcite sub-verticaux et sub-horizontaux perpendiculaires à ce plan de stratification.

Par contre dans la deuxième déformation, il devrait y avoir encore une plus grande extension

dans le plan de schistosité  $\sqrt{\lambda_1}'' = \sqrt{\lambda_2}'' = 1,17$ , ce que l'on n'observe pas, puisqu'il n'y a presque pas de fissures horizontales liées à la schistosité qui traduiraient un allongement vertical. De plus, les plans de stratification ne sont pratiquement jamais remplis de calcite solubilisée dans les plans de stylolithes, alors que cette deuxième déformation a dû se produire sur un matériau déjà induré, puisque déjà fissuré lors de la première déformation. Perpen-

diculairement au plan de schistosité, les fissures à calcite, qui sont liées à cette schistosité, sont plutôt en échelon et associées en plans de cisaillement conjugués, ce qui ne traduit pas particulièrement une extension dans le plan de schistosité d'autant plus que les directions de contraction que l'on peut en déduire ont des pendages assez variables (fig. 2). Dans des plans de cisaillement horizontaux, la torsion de la schistosité est accompagnée par des fissures à calcite en échelon qui peuvent être dissoutes par les plans de stylolithes tordus avec des pics d'une direction proche de la verticale (fig. 2B plan N 55 vertical).

Toutes ces observations tendent à montrer qu'il n'y a presque pas d'extension dans le plan de schistosité (au moins traduite par les marqueurs étudiés). Cela prouverait donc que la deuxième déformation s'est produite avec diminution de volume.

Cette diminution de volume pourrait être due au fonctionnement de très fins mais très nombreux plans de stylolithes qui se comporteraient alors comme une structure pénétrante et continue à l'échelle de l'affleurement. Malheureusement ces plans de stylolithes sont presque invisibles à l'œil nu et ils ne peuvent pas être l'objet de mesures de contraction directement en carrière.

Il existe cependant des plans de stylolithes dans lesquels la dissolution a été suffisamment importante pour permettre des mesures de contraction, mais leur fréquence est alors trop faible pour pouvoir

les assimiler à une structure pénétrante (à l'échelle de l'affleurement) représentant la même déformation que celle des fossiles. Ces plans doivent être considérés comme traduisant une déformation discontinue qui s'ajoute à la déformation continue estimée précédemment. Ces grands plans de stylolithes sont très intéressants parce qu'ils donnent directement des valeurs principales de déformation, ce qui permet de chiffrer effectivement un changement de volume.

#### MARQUEURS DE DÉFORMATION DISCONTINUE (À L'ÉCHELLE DE L'AFFLEUREMENT).

*Les plans de stylolithes.* Les stylolithes sont considérés comme des plans témoignant d'une dissolution du calcaire sous contrainte. L'étude des Brachiopodes déformés montre que la direction des pics stylolithiques correspond bien à la direction de contraction. Les plans de stylolithes ne traversent pas les objets durs (Brachiopodes, Stromatopores, Polypiers). Ils les contournent et la dissolution se produit autour d'eux. Par contre, d'anciennes fissures à calcite sont dissoutes dans certains plans de stylolithes appartenant aux deux familles (fig. 2). Ceux-ci sont donc intervenus sur une roche déjà indurée et localement fissurée. Pour estimer la quantité de matière dissoute, on peut utiliser différentes méthodes résumées dans la figure 5.

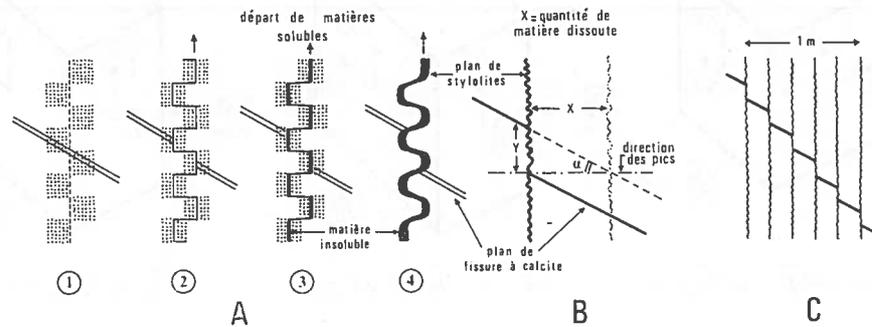


FIG. 5. — Mesure de la quantité de matière dissoute dans les plans de stylolithes.

5A : différents stades de l'évolution d'un plan de stylolithes : pour chaque stade, il a été figuré une zone en pointillés représentant la calcite qui sera solubilisée au stade suivant. Cette calcite sera évacuée par les plans de stylolithes, alors que les matières noires insolubles qu'elle contient s'accumuleront dans ces mêmes plans. 5B : utilisation du décalage (Y) des fissures à calcite dissoute par les plans de stylolithes, pour calculer la quantité de matière dissoute (X).  $\alpha$  est l'angle entre les fissures à calcite et la direction de contraction (pics stylolithiques). 5C : une même fissure à calcite dissoute par une série de plans de stylolithes.

Wagner a proposé de mesurer la longueur des pics stylolithiques mais cette mesure ne représente qu'un minimum de la quantité dissoute (passage du stade 1, au stade 2 de la fig. 5A). Si la dissolution continue, au stade 3 et 4 les matières noires insolubles s'accumulent dans les plans de stylolithes et tendent à effacer la forme des pics. Les plans de

stylolithes deviennent des plans d'accumulation de « schistes » noirs, et si la fréquence de ces plans est élevée, on a l'impression d'une « schistosité ».

Une autre méthode intéressante serait de comparer la concentration en matières noires insolubles dans la roche et dans les plans de stylolithes, mais il ne faut pas que ceux-ci soient trop rapprochés.

Une troisième possibilité est d'utiliser le décalage des fissures de calcite dissoute (fig. 5B). En effectuant les mesures dans un plan perpendiculaire aux plans de stylolithes, la quantité de matière dissoute est égale à  $Y/\text{tg } \alpha$ ,  $Y$  étant le décalage de la fissure au niveau du plan de stylolithe, et  $\alpha$  l'angle entre le plan de fissure et la direction de contraction (c'est-à-dire la direction des pics).

Dans les carrières, une même fissure de calcite peut être dissoute par toute une série de plans de stylolithes (fig. 5C), dans ce cas on peut estimer la contraction. Malheureusement les mesures ne peuvent être que relativement localisées parce que pour chaque fissure dissoute, la longueur mesurée dépasse rarement le mètre. De plus il n'y a pas suffisamment de fissures à calcite antérieures aux plans de stylolithes pour permettre la mesure de contraction pour chaque plan.

La quantité de matière dissoute n'est pas la même pour tous les plans, mais elle correspond bien chaque fois à l'épaisseur de matières noires insolubles (fig. 5A). En utilisant le décalage des fissures à calcite, on trouve des contractions de 10 % à 50 % et en tenant compte de l'ensemble des plans, la contraction peut être estimée à 15 % perpendiculairement au plan de stratification, et à 25 % perpendiculairement au plan de schistosité.

Ces quantités correspondent à une diminution de volume globale de 36 %. Il faut remarquer que cette diminution est estimée par rapport au volume après la déformation continue marquée par les fossiles, et qu'un changement de volume dans la déformation continue s'ajouterait à celui mis en évidence par la déformation discontinue à l'échelle de l'affleurement.

La calcite solubilisée dans les plans de stylolithes peut quitter effectivement la roche, et dans ce cas il y a bien diminution du volume, assimilable à une compaction. Mais cette calcite peut aussi recristalliser dans d'autres structures voisines : en remplissant les fissures ou plans de discontinuités préexistants, et en provoquant un allongement perpendiculaire à la contraction. Il est donc indispensable d'évaluer la quantité de calcite recristallisée si on veut connaître le changement de volume réel de la roche. La calcite nouvellement recristallisée se distingue facilement de l'ensemble de la roche puisqu'elle a abandonné ses particules noires insolubles dans les plans de stylolithes et qu'elle apparaît très blanche sur la roche gris foncé.

*Les fentes à calcite.* Le terme fente à calcite recouvre à la fois les fissures à calcite et les remplissages calciteux de plans de discontinuités. Ces fentes traduisent un allongement dans une direction perpendiculaire à leur plan. Sur un parement, la quantité de calcite blanche recristallisée est égale au nombre de fentes multiplié par leur épaisseur, les mesures étant effectuées perpendiculairement aux plans de calcite. Le problème est simplifié par le fait qu'il n'y a que quelques directions de fentes à calcite, et que ces directions sont à peu près perpendiculaires à chacun des trois parements de découpe.

Les quantités exprimées sous la forme du rapport  $L/L_0 = \sqrt{\lambda}$  sont représentées dans la figure 6. En réunissant les diverses mesures de  $\sqrt{\lambda}$  suivant trois directions principales X.Y.Z., on peut estimer que  $\sqrt{\lambda_1} = 1,045$ ;  $\sqrt{\lambda_2} = 1,035$ ;  $\sqrt{\lambda_3} = 1,015$ . Ces valeurs représentent une augmentation de volume de 10 % (par rapport au volume après déformation continue).

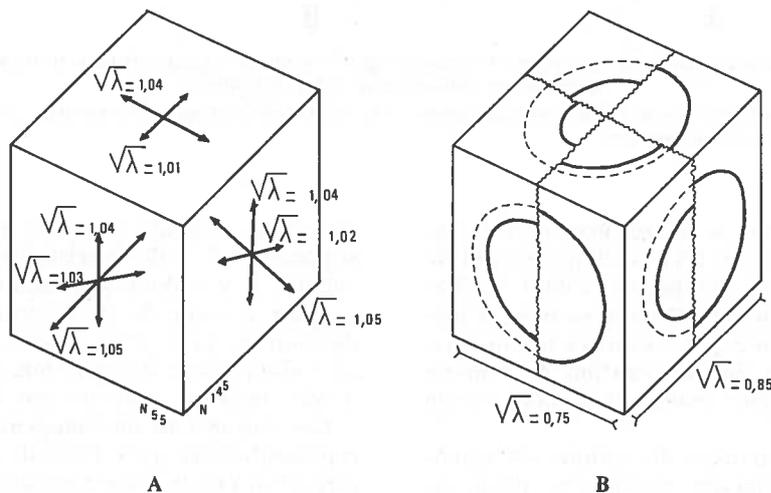


FIG. 6. — Valeurs de la déformation données par chacun des deux marqueurs de déformation discontinue à l'échelle de l'affleurement, sur les trois parements de découpe orthogonaux.

$\sqrt{\lambda}$  = longueur actuelle sur longueur initiale ; 6A : valeurs données par les fentes à calcite ; 6B : valeurs données par les plans de stylolithes.

Remarques : les directions X.Y.Z. données par les fentes à calcite ne correspondent pas exactement aux axes X.Y.Z. donnés par les plans de stylolithes. Il faut penser que ces fentes à calcite sont liées à deux directions de contraction successives ce qui a pu modifier leur attitude. De plus, les fissures à calcite sont souvent en échelon, ce qui introduit localement des inhomogénéités qui sont négligeables quand on fait intervenir les facteurs quantitatifs.

#### CONCLUSIONS.

Dans l'étude des déformations et du changement de volume d'un marbre à stylolithes de la région de Rabat, trois marqueurs de déformation ont été utilisés : les plans de stylolithes, les fentes à calcite et les Brachiopodes déformés.

— Les plans de stylolithes et les fossiles déformés indiquent exactement les mêmes axes de déformation finie X.Y.Z. (fig. 3 et 6). Les pics stylolithiques sont, en moyenne, perpendiculaires aux plans de stylolithes et parallèles aux directions de contractions indiquées par les fossiles.

— Les fentes à calcite montrent des axes X.Y.Z. moins réguliers que ceux donnés par les deux marqueurs précédents, mais néanmoins d'attitude très proche (fig. 6).

Ces trois marqueurs permettent de mettre en évidence deux contractions successives de directions orthogonales (fig. 4) : — la première est perpendiculaire aux plans de stratification verticaux, qui sont soulignés par des plans de stylolithes ; — la deuxième est perpendiculaire à d'autres plans de stylolithes, très nombreux, qui ont été assimilés à une schistosité que l'on pourrait qualifier de schistosité de dissolution.

Du point de vue descriptif, les deux contractions sont schématisées dans la figure 7, les modèles B et C représentant respectivement la première et la deuxième. Dans les deux cas, on peut considérer la déformation interne globale comme une association : — de plans de discontinuité d'attitude régulière (plans de stylolithes) ; — et d'une déformation continue et inhomogène entre ces plans (inhomogène puisque les fossiles, servant de marqueurs, montrent des valeurs de déformation variables suivant une même direction (fig. 3).

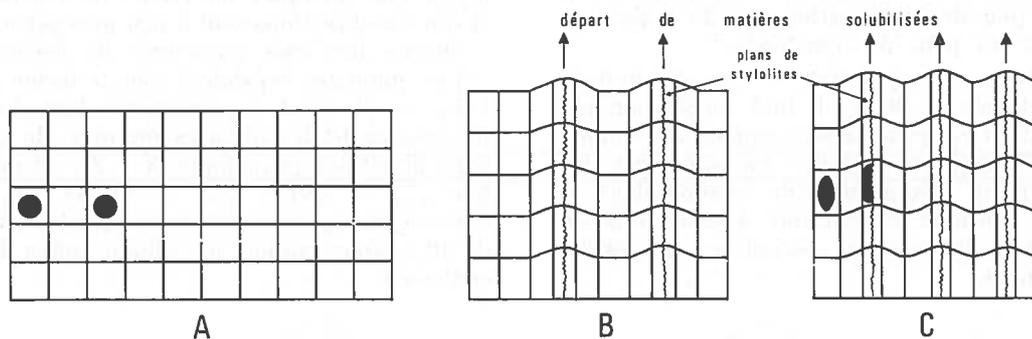


FIG. 7. — Schéma de déformation associant des plans de discontinuité d'attitude régulière (plans de stylolithes) et une déformation continue et inhomogène entre ces plans.

7A : état non déformé ; 7B : contraction perpendiculaire à la stratification-plans de stylolithes ; 7C : contraction perpendiculaire à la schistosité-plans de stylolithes.

Pour mettre en évidence le changement de volume, avec des marqueurs comme les Brachiopodes qui ne donnent que la forme de l'ellipsoïde, il faut étudier séparément les deux contractions successives, et utiliser les indications données par les autres marqueurs. On peut ainsi montrer une diminution de volume surtout liée à la deuxième contraction, mais on ne peut pas la chiffrer.

Par contre, une diminution de volume est quantifiable avec des marqueurs comme les plans de stylolithes et les fentes à calcite qui donnent effectivement des valeurs principales de déformation. Dans l'état de déformation finie, superposition des deux contractions de directions orthogonales, la quantité

de calcite dissoute dans les plans de stylolithes est supérieure à celle recristallisée dans les fentes à calcite. Il y a donc une diminution du volume par rapport à celui de la déformation continue. Cette diminution peut être estimée à 26 % par rapport au volume avec déformation continue. Elle s'ajoute à celle mise en évidence par les fossiles.

Ces estimations de changement de volume ne sont représentatives qu'à l'échelle des carrières, c'est-à-dire à l'intérieur d'une amande calcaire de dimensions hectométriques. En allant vers les limites de celle-ci, la quantité de calcite recristallisée augmente nettement, mais les mesures sont alors rendues aléatoires, par la présence des grandes failles qui

limitent cette amande.

Dans la région étudiée, il est possible que les matières solubilisées à l'intérieur des amandes calcaires aient migré vers l'extérieur, « drainées » par les plans de stylolithes. Ces fluides ont pu faciliter l'apparition et le fonctionnement des grandes failles

limitant les amandes, et même de celles limitant l'ensemble du massif de calcaire dévonien au milieu des schistes et quartzites du Carbonifère (fig. 1).

*Remerciements* : Je remercie M. P. Vialon de l'aide qu'il m'a apportée dans la réalisation de ce travail.

---

### Références citées

- ARTHAUD F. et MATTAUER M. (1969). — Exemple de stylolithes d'origine tectonique dans le Languedoc, leur relation avec la tectonique cassante. *Bull. Soc. Géol. Fr.*, (7), XI, p. 738-744.
- DESTOMBES J.-P. et JEANNETTE A. (1965). — Notice géologique de la carte géotechnique de la méséta côtière à l'Est de Casablanca. *Notes mém. Serv. Géol. Maroc*, n° 180.
- LECOINTRE G. (1926). — Étude du paléozoïque de la région de Rabat. *Mém. Soc. Sc. nat. Maroc*.
- RAMSAY J. G. (1967). — Folding and fracturing of rocks. MacGraw-Hill ed.
- RAMSAY J. G. et WOOD D. (1973). — The geometric effects of volume change during deformation process. *Tectonophysics*, 13, p. 263-277.
- VIALON P., RUHLAND M. et GROLIER J. (1976). — Éléments de tectonique analytique. Paris, Masson édit.
- WAGNER V. G. — Kleintecktonische Untersuchungen im Gebiet des Nordlinger Riess. *Geol. Jhrb.*, Bd. 81, p. 519.

