

Déformations des linéations

Autor(en): **Caron, Jean-Michel**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Eclogae Geologicae Helvetiae**

Band (Jahr): **72 (1979)**

Heft 2

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-164849>

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 des linéations

Par JEAN-MICHEL CARON¹⁾

RÉSUMÉ

Les principales équations permettant de déterminer l'orientation acquise par des linéations en fonction de leur orientation initiale et des paramètres de la déformation sont brièvement rappelées dans le cas de déformation homogène finie et progressive. On examine ensuite la déformation de linéations autour de différents types de plis simples, avec une attention particulière pour le cas de plis coniques à section circulaire. Ces différents modèles simples sont enfin confrontés à quelques cas réels de déformation de linéations autour de plis mineurs dont ils permettent de préciser l'évolution.

ABSTRACT

Basic equations giving the orientation of deformed lineations as a function of their former orientation and of strain parameters are briefly reminded for homogeneous finite strain and for homogeneous progressive strain. The disposition of deformed lineations around different types of folds is then presented, with a peculiar attention to conical folds. These elementary models are finally used to analyse evolution steps of some real minor folds.

1. Introduction

Des structures pénétratives linéaires, ou linéations, sont très fréquentes dans les roches déformées. Elles y sont en général associées à des structures planaires (schistosité ou foliation). Elles constituent (notamment les linéations minérales) une anisotropie difficilement oblitérée lors de déformations ultérieures. Ainsi, lors d'une tectonique polyphasée, les linéations forment un repère régulier, dont la réorientation progressive fournit un marqueur de l'évolution des déformations.

L'analyse des linéations déformées permet, suivant les cas, de préciser l'orientation, le type, et/ou l'intensité des déformations suivantes:

- Déformation homogène finie, si l'on connaît l'orientation initiale des lignes.
- Déformation hétérogène, dont elles constituent un marqueur privilégié.
- Progression, ou du moins certaines étapes de la progression des déformations.

Les principaux problèmes liés à la déformation des linéations ont déjà été détaillés, par exemple par RAMSAY (1967), et seront brièvement rappelés. Quelques aspects complémentaires seront en outre présentés.

¹⁾ Institut de Géologie, 1, rue Blessig, F-67084 Strasbourg Cedex (France).

2. Déformation homogène finie

On considère un solide soumis à une déformation homogène finie. Un point $M_0(x_0, y_0, z_0)$ (état initial) est déplacé en un point $M_1(x_1, y_1, z_1)$ (état final). Dans un espace à trois dimensions, la déformation est décrite par un tenseur $[D]$ d'ordre 3. On choisit les axes de coordonnées tels que la matrice de transformation correspondant à la partie non rotationnelle de la déformation soit une matrice diagonale $[D_D]$.

C'est-à-dire $[M_1] = [D_D][M_0]$, soit

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda_1^{1/2} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^{1/2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix}$$

On décrit ainsi le champ des déplacements d'un ensemble de points.

Si le point M_0 est situé sur la sphère unité, ses coordonnées sont les cosinus directeurs de la direction correspondante, soit l_0, m_0, n_0 . Le carré de la longueur OM_1 est donné par $[M_1][M_1] = [M_0][D_D][D_D][M_0]$,

$$\text{soit } [x_1 y_1 z_1] \cdot \begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = [l_0 m_0 n_0] \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1^{1/2} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^{1/2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1^{1/2} & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2^{1/2} & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3^{1/2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} l_0 \\ m_0 \\ n_0 \end{bmatrix}$$

c'est-à-dire $x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 = l_0^2 \lambda_1 + m_0^2 \lambda_2 + n_0^2 \lambda_3 = \lambda$.

Soit $[U_1]$ la matrice représentant le vecteur unitaire (l_1, m_1, n_1) de la direction OM_1 :

$$[M_1] = \lambda^{1/2} [U_1],$$

$$\text{d'où } [U_1] = \lambda^{-1/2} [M_1] = \lambda^{-1/2} [D_D][M_0],$$

$$\text{c'est-à-dire } \begin{cases} l_1 = \lambda^{-1/2} \cdot \lambda_1^{1/2} \cdot l_0 \\ m_1 = \lambda^{-1/2} \cdot \lambda_2^{1/2} \cdot m_0 \\ n_1 = \lambda^{-1/2} \cdot \lambda_3^{1/2} \cdot n_0 \end{cases}$$

Ceci permet de caractériser la réorientation de toute ligne d'orientation initiale connue lors d'une déformation finie caractérisée par un ellipsoïde de demi-axes $X/Y/Z = \lambda_1^{1/2}/\lambda_2^{1/2}/\lambda_3^{1/2}$, en choisissant les axes de coordonnées parallèles aux directions principales de la déformation finie (fig. 1).

Lorsque $Y \neq Z$, les linéations tendent à se regrouper dans le plan d'aplatissement principal XY . Lorsque $X \neq Y$, les linéations se regroupent autour de l'axe d'allongement X . Ces tendances sont déjà nettes pour des déformations encore peu intenses.

3. Déformation homogène progressive

Une déformation finie est le résultat d'une suite de déformations infinitésimales. Dans l'étude de la réorientation de nombreuses structures (schistosités, linéations,

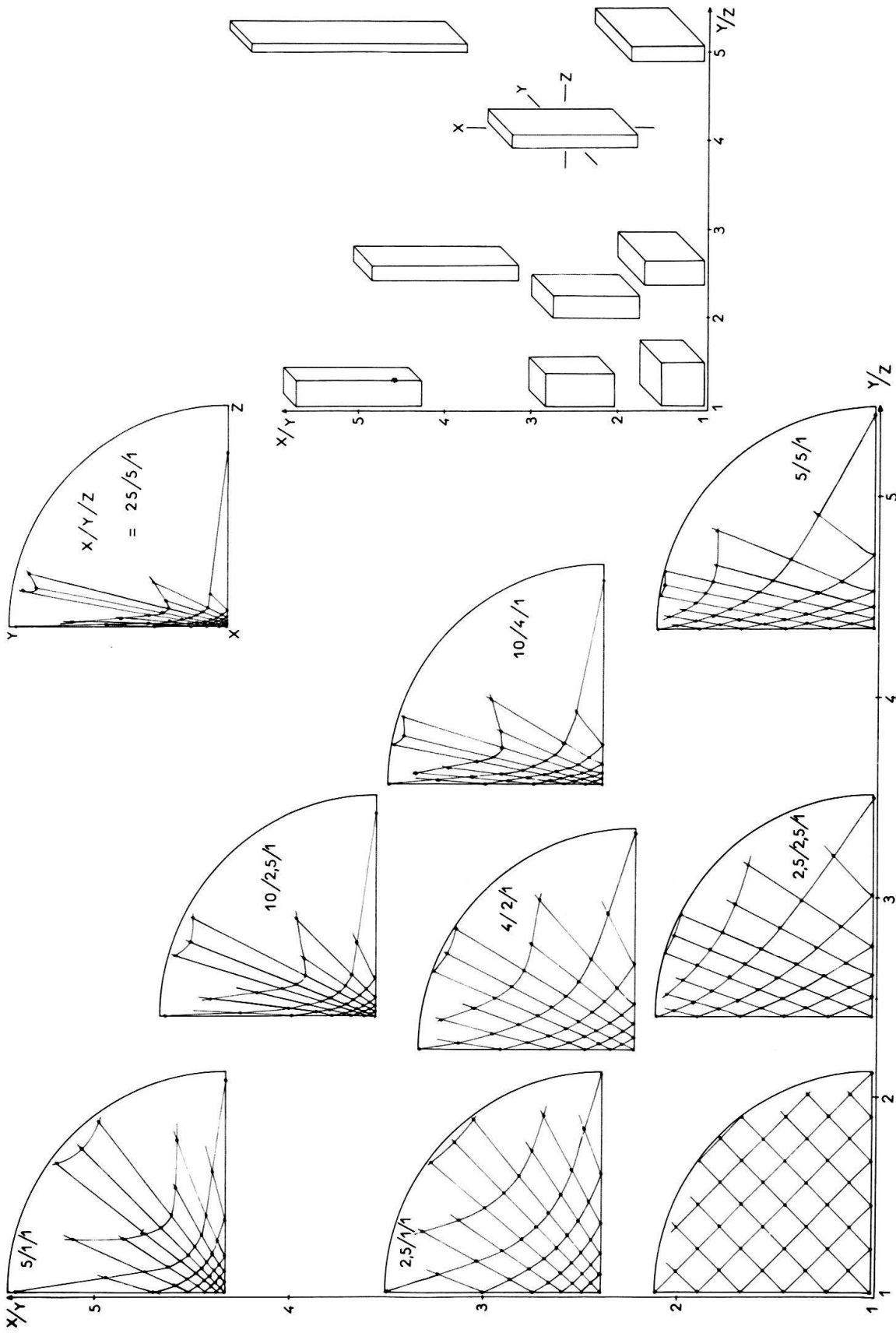


Fig. 1. Réorientation de linéations par des déformations finies de type et d'intensité variés (cf. partie droite de la figure). L'orientation initiale des linéations est répartie régulièrement (cf. diagramme en bas à gauche). Projection équivalente.

plis, minéraux), il est important de pouvoir préciser l'histoire des déformations infinitésimales ou incrémentales successives, surtout lorsque celles-ci ne sont pas restées coaxiales.

Une suite de déformations non coaxiales peut être décrite

- soit comme la superposition simultanée d'une déformation non rotationnelle et d'une rotation d'ensemble (ELLIOT 1972),
- soit comme la superposition simultanée d'une déformation non rotationnelle et d'un cisaillement simple (RAMBERG & GHOSH 1977).

De même que, pour décrire une déformation homogène finie, on partait du champ des déplacements, on part du champ des vitesses pour décrire une déformation progressive. RAMBERG & GHOSH (1977) ont développé les calculs dans un cas où l'agencement relatif des axes d'aplatissement-élongation et de cisaillement est simple: cisaillement parallèle au plan XY de la déformation non rotationnelle, suivant la direction X (fig. 2).

Si l'on choisit les axes de coordonnées parallèles aux directions principales de la déformation non rotationnelle, le champ des vitesses est décrit par un système d'équations différentielles:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial x}{\partial t} \\ \frac{\partial y}{\partial t} \\ \frac{\partial z}{\partial t} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial x}{x \partial t} & 0 & \frac{\partial x}{z \partial t} \\ 0 & \frac{\partial y}{y \partial t} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial z}{z \partial t} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_x & 0 & \dot{\gamma} \\ 0 & \dot{\epsilon}_y & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\epsilon}_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Si les taux de déformation $\dot{\epsilon}_x$, $\dot{\epsilon}_y$, $\dot{\epsilon}_z$ et $\dot{\gamma}$ sont constants, l'intégration de ce système d'équations fournit, à tout instant t la position de chaque point en fonction de sa position initiale. Pour ce qui concerne la réorientation des lignes, qui nous occupe ici, les calculs développés par RAMBERG & GHOSH aboutissent au résultat suivant, qui donne, pour une déformation isovolumétrique, les cosinus directeurs l_t , m_t , n_t d'une ligne à l'instant t en fonction des cosinus directeurs l_{001} , m_{001} , n_{001} de la même ligne à l'instant 0,001, dans le repère indiqué ci-dessus.

$$\begin{cases} l_t = x \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} \\ m_t = y \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} \\ n_t = z \cdot (x^2 + y^2 + z^2)^{-1/2} \end{cases} \quad \text{où} \quad \begin{cases} x = A' l_{001} + C' n_{001} \\ y = E' m_{001} \\ z = J' n_{001} \end{cases}$$

avec $A' = \exp[\dot{\epsilon}_x(t - 0,001)]$

$$C' = \frac{\dot{\gamma}}{2\dot{\epsilon}_x + \dot{\epsilon}_y} \{ \exp[\dot{\epsilon}_x(t - 0,001)] - \exp[(-\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)(t - 0,001)] \}$$

$$E' = \exp[\dot{\epsilon}_y(t - 0,001)]$$

$$J' = \exp[(-\dot{\epsilon}_x - \dot{\epsilon}_y)(t - 0,001)]$$

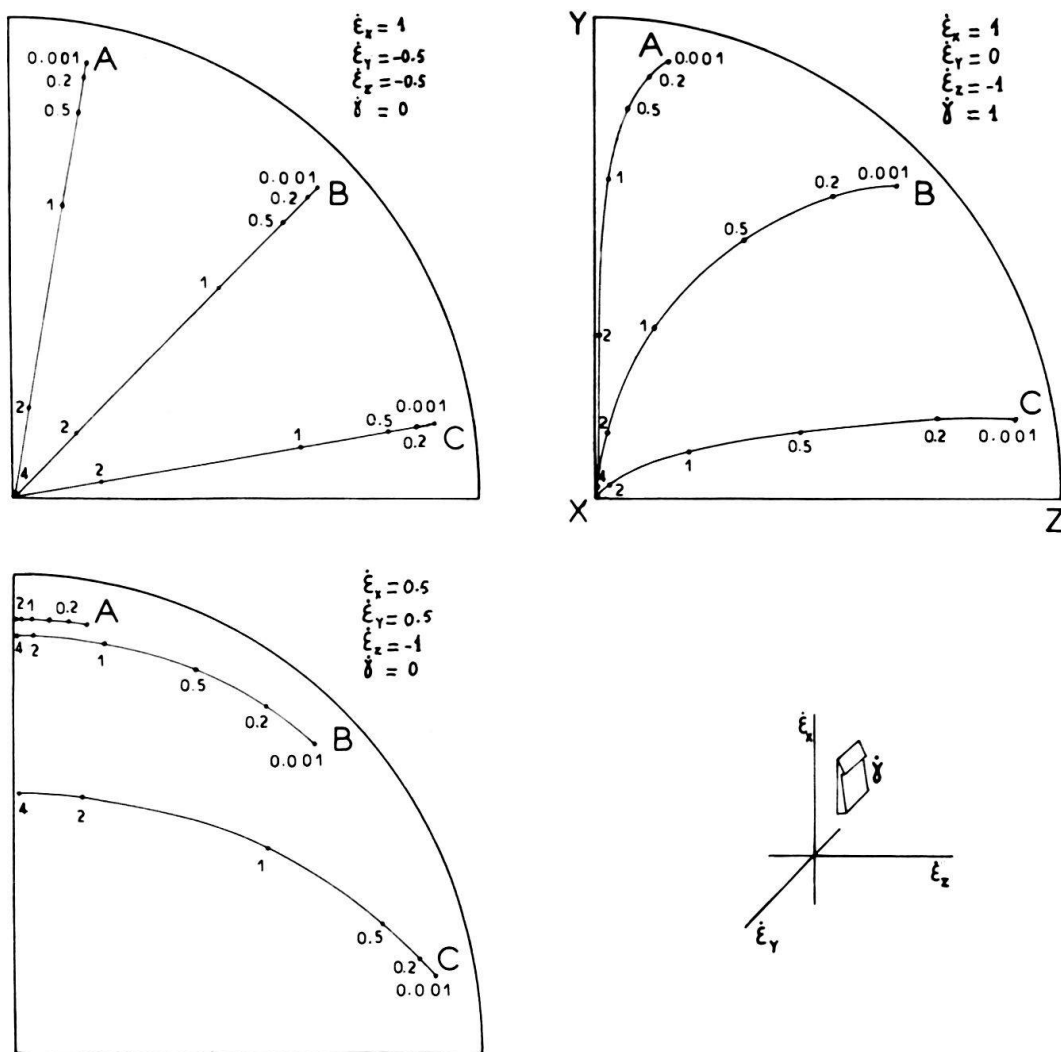


Fig. 2. Réorientation progressive de trois linéations d'orientation initiale A, B, C dans trois types de déformation progressive. Les nombres $t=0,001, 0,2, 0,5, 1, 2, 4$ correspondent à différentes valeurs du temps. Projection équivalente.

Il est ainsi possible de simuler la réorientation progressive d'une linéation dans les conditions indiquées (fig. 2).

RAMBERG & GHOSH soulignent en outre un aspect important de ce problème. Ils considèrent une linéation portée par une surface donnée, où initialement elle coïncide avec l'un des axes principaux de l'ellipse de déformation dans cette surface. Ils montrent que, lors d'une déformation progressive, la linéation qui constitue un marqueur passif tourne plus vite que l'axe de déformation de la couche avec lequel elle coïncidait. Au bout d'une déformation suffisamment longue, le grand axe de l'ellipse tend à se paralléliser à nouveau avec la linéation qui lui était initialement parallèle; au contraire, l'angle entre le petit axe et son marqueur initial tend vers 90° .

4. Déformation hétérogène: plis

Même si la déformation des roches peut, dans certains cas favorables, être envisagée comme homogène à une échelle donnée, il est irréaliste de la considérer

comme homogène à toutes les échelles. L'hétérogénéité de la déformation est attestée par l'existence de plis, qui affectent des surfaces initialement quasi-planes (stratification, foliation, schistosité), ainsi que des lignes initialement quasi-droites (linéations) portées par ces surfaces. La répartition de la déformation au sein d'un ensemble plissé est en général complexe. Aussi nous limiterons-nous à quelques cas simples qui nous permettront de montrer que les linéations déformées constituent de bons marqueurs des différents types de plis (RAMSAY 1967).

a) Plis cylindriques par flexion

Autour de plis cylindriques formés par flexion, une linéation déformée fait un angle constant avec la génératrice du pli. Elle est ainsi enroulée suivant une hélice.

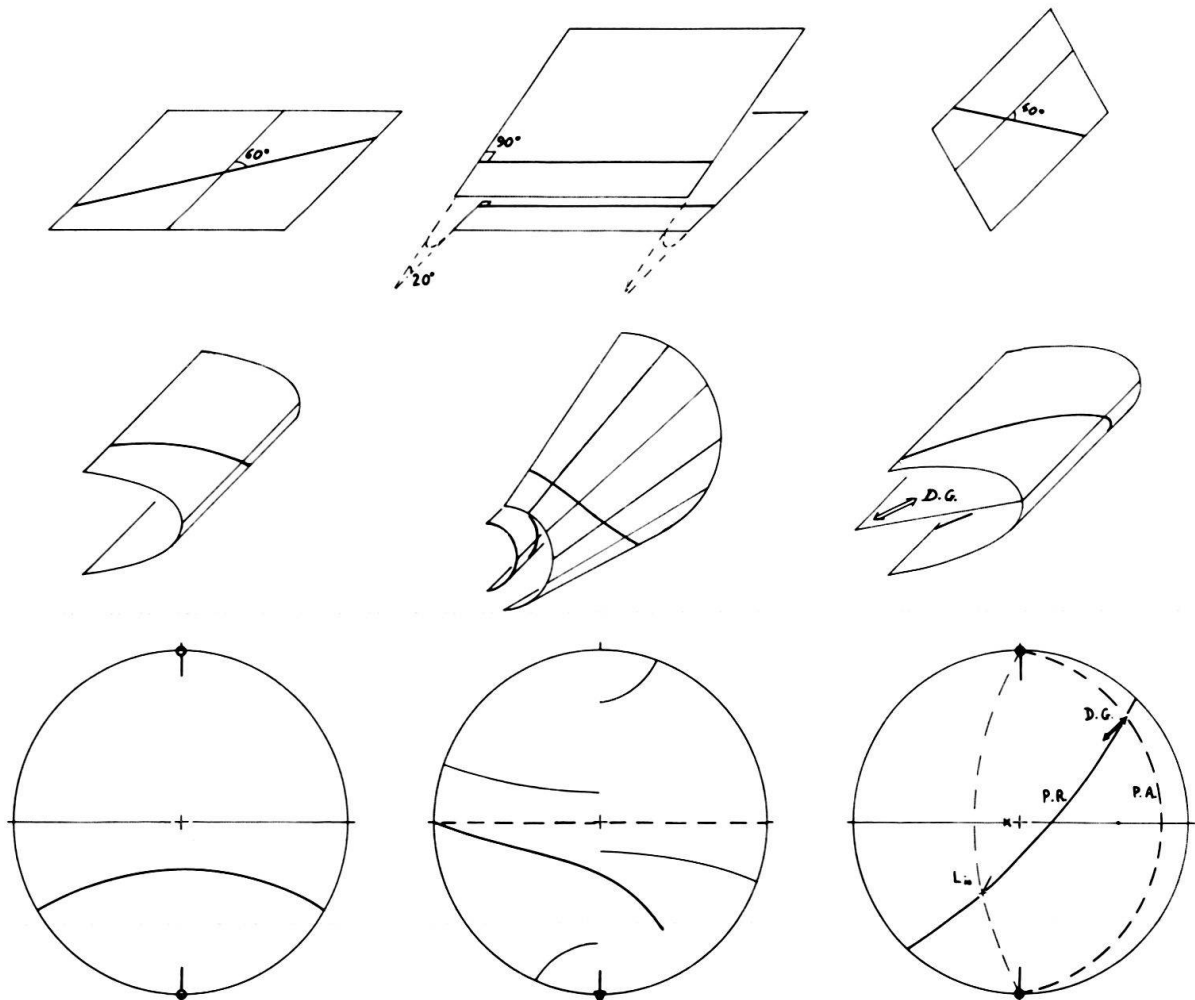


Fig. 3. Linéations déformées par des plis. Projection conforme, hémisphère supérieur.

A gauche, enroulement d'une linéation autour d'un pli cylindrique par flexion.

Au centre, deux surfaces formant un angle de 20° portent des linéations initialement parallèles entre elles. Après plissement, la surface interne dessine un pli cylindrique, et la linéation déformée fait un angle constant avec la génératrice (et donc avec l'axe). La surface externe dessine une portion de cône autour duquel varie l'angle entre linéation et génératrice ainsi que l'angle entre linéation et axe.

A droite, déformation d'une surface par cisaillement hétérogène parallèle à la direction de glissement (D.G.). La linéation déformée reste contenue dans un plan de reprise (P.R.) défini par la direction de la linéation initiale et par la direction de glissement.

Le lieu des directions de la linéation déformée est donc une portion de cône. Ceci se traduit, en projection stéréographique conforme, par la disposition sur un petit cercle des pôles de la linéation déformée (fig. 3).

b) *Plis coniques*

Autour de plis coniques, l'angle entre une linéation déformée et la génératrice du cône varie progressivement (STAUFFER 1964), ainsi que l'angle entre la linéation et l'axe du cône (fig. 3). Dans les cas simples la section des plis coniques perpendiculaire à l'axe est une portion de cercle. Il est alors possible de préciser la loi de variation de l'orientation de la linéation déformée en comparant la géométrie du cône et la géométrie du cône déroulé (fig. 4).

Soit

- ω l'angle de demi-ouverture du cône,
- Ω le demi-angle au sommet du secteur correspondant sur le cône déroulé,
- β_0 l'angle entre la linéation déformée et une génératrice de référence,
- α l'angle, dans le plan perpendiculaire à l'axe du cône, entre le plan contenant la génératrice de référence et le plan contenant une autre génératrice.

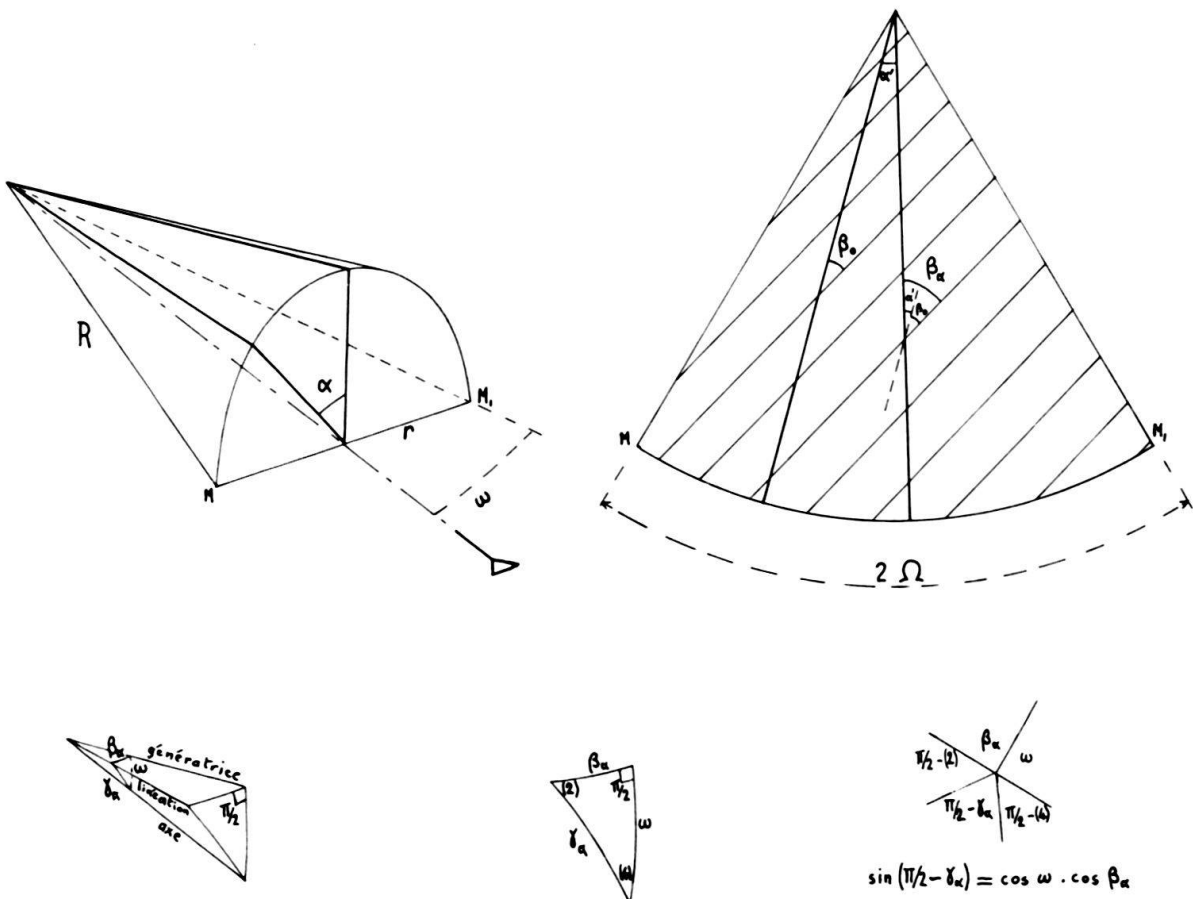


Fig. 4. Enroulement d'une ligne autour d'un cône à section circulaire.

En haut à gauche, géométrie du cône. En haut à droite, cône déroulé correspondant. En bas, éléments de calcul de l'angle entre ligne et axe.

La linéation fait avec cette autre génératrice un angle β_a différent de β_0 , tel que $\beta_a = \beta_0 + \alpha'$ où α' est l'angle entre la génératrice de référence et la génératrice étudiée, sur le cône déroulé.

$$\frac{\alpha'}{2\Omega} = \frac{a}{\pi}$$

$$MM_1 = R \cdot 2\Omega = \pi r = \pi R \sin \omega$$

$$\text{d'où } 2\Omega = \pi \sin \omega$$

$$\text{et } \alpha' = \frac{2\Omega \cdot a}{\pi} = a \cdot \sin \omega$$

ce qui nous donne l'angle β_a entre la linéation déformée et une génératrice définie par a , en fonction de a , ω et β_0 :

$$\beta_a = \beta_0 + a \sin \omega$$

β_0 : angle entre la linéation et la génératrice de référence
 a : angle de rotation du plan radial porteur de la génératrice autour de l'axe du cône
 $\sin \omega$: demi-ouverture du cône
 β_a : angle entre la linéation et la génératrice

Pour comparer la disposition d'une linéation reprise autour d'un pli conique à celle que l'on aurait autour d'un pli cylindrique, il est en fait souvent plus commode de se servir de l'angle γ_a entre la linéation déformée et l'axe du pli.

Il suffit pour cela d'appliquer la formule de trigonométrie sphérique suivante (fig. 4):

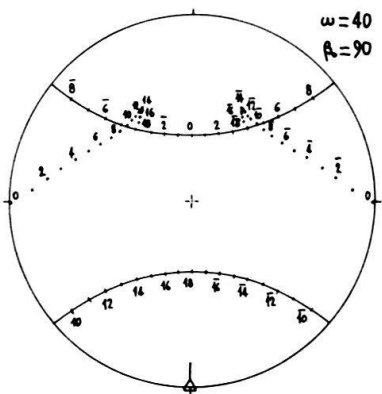
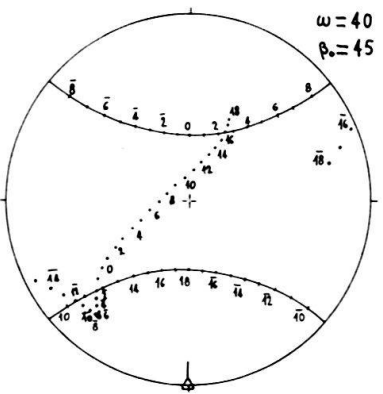
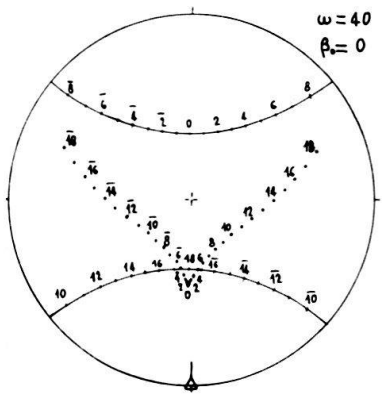
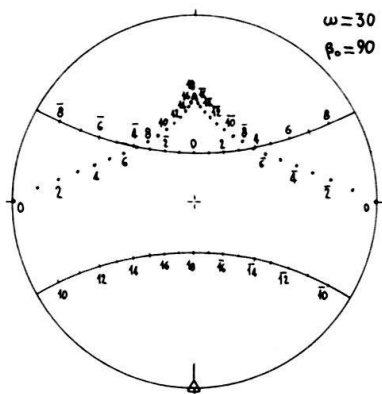
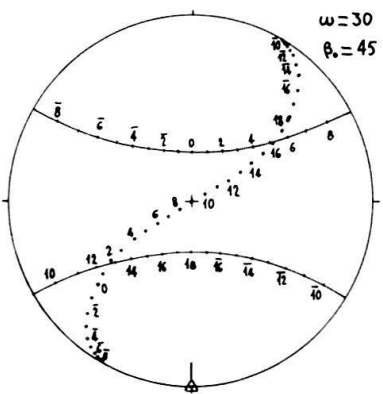
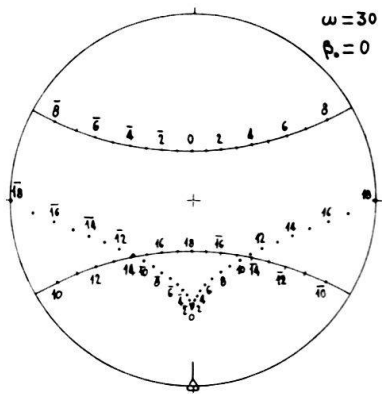
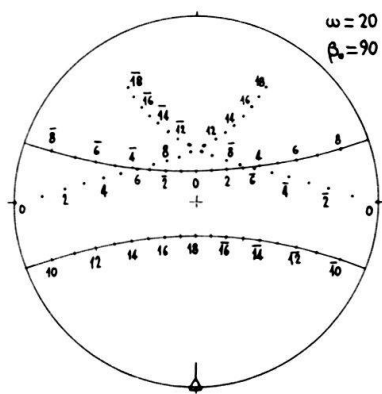
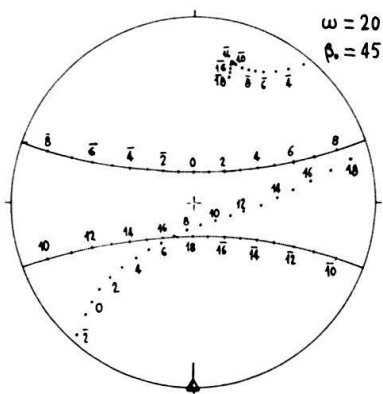
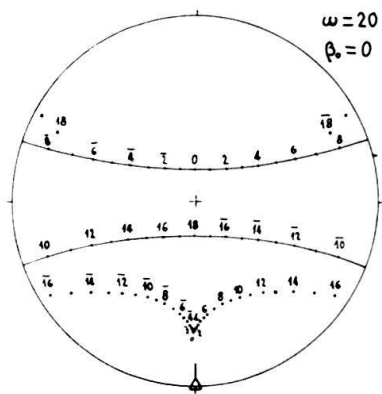
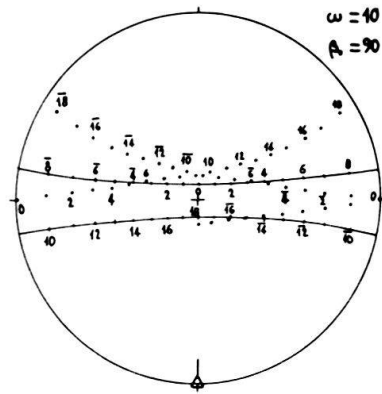
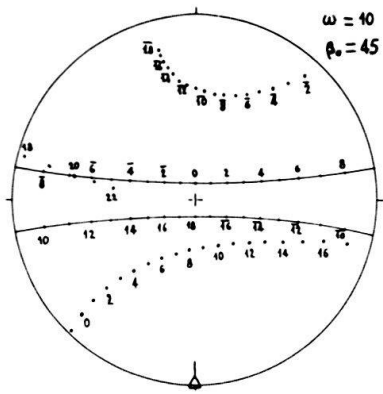
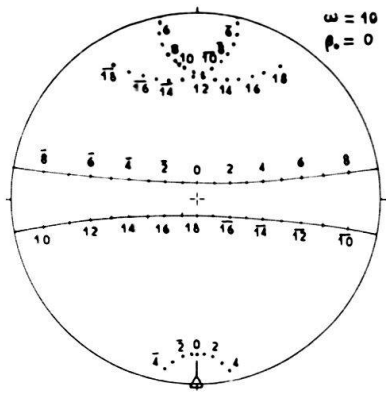
$$\sin(\pi/2 - \gamma_a) = \cos \omega \cdot \cos \beta_a,$$

$$\text{soit } \cos \gamma_a = \cos \omega \cdot \cos \beta_a = \cos \omega \cdot \cos(\beta_0 + a \sin \omega).$$

On peut ainsi construire facilement les abaques correspondant à des plis coniques d'ouverture variée (fig. 5).

On remarque ainsi que la disposition des linéations déformées est souvent plus précieuse que la disposition des surfaces déformées pour identifier et caractériser un pli conique.

Fig. 5. Reprise de linéations autour de plis coniques, pour des valeurs variables de ω (angle de demi-ouverture du cône) et de β_0 (angle entre linéation et génératrice de référence). Les chiffres, en dizaine de degrés, correspondent à différentes valeurs de a (voir texte). Projection conforme, hémisphère supérieur.



c) *Plis par glissement*

Un autre modèle simple de déformation de linéation autour de plis concerne des plis engendrés par le glissement différentiel de tranches de matières parallèles entre elles (et au plan axial du pli). La linéation déformée reste alors dans un plan contenant la direction originelle de la linéation et la direction de glissement (WEISS 1959, RAMSAY 1960). Dans ce plan, elle tend d'autant plus à se paralléliser avec la direction de glissement que le glissement est plus intense, c'est-à-dire que le pli est plus fermé (fig. 3). Il est ainsi possible, à partir d'une telle géométrie, de construire la direction de glissement (WEISS 1959, RAMSAY 1960): en projection stéréographique, la direction de glissement se trouve à l'intersection

- de la trace cyclographique du plan axial du pli (P.A.),
- du grand cercle, lieu des pôles des linéations déformées (P.R.).

En pratique, il faut être extrêmement attentif au fait suivant: il est fréquent que, pour des plis engendrés par des mécanismes variés, les pôles de la linéation déformée se disposent approximativement sur un grand cercle. Mais la construction proposée n'a de signification de direction de glissement que si le pli a effectivement été engendré par glissement, c'est-à-dire si les pôles de la linéation déformée sont situés rigoureusement sur un grand cercle.

5. Indications sur quelques cas réels de déformation de linéations

Dans la plupart des cas réels, la déformation des linéations ne s'est pas faite de manière simple. Une étude attentive des linéations déformées permet cependant, dans les cas favorables, de décomposer la suite des déformations en étapes élémentaires.

a) *Exemples de linéations déformées autour de plis (analyse succincte de deux stéréogrammes) (fig. 6)*

- Un nombre restreint de mesures (5 ou 6) permettrait de construire approximativement un grand cercle.
- Distinction de la zone charnière (points 3 à 10) et des flancs.
- Dans la zone charnière, petit cercle (pli par flexion).
- Dans les flancs, en s'éloignant de la charnière, écart au petit cercle, et tendance au parallélisme des linéations portées par les deux flancs.
- Une déformation homogène des flancs ne rend pas compte de la disposition exacte des points dans cet exemple.

Interprétation: Pli né par flexion (étape «fossilisée» dans la zone charnière). Puis reprise des flancs par un cisaillement hétérogène (rend compte notamment des points 11 et 16-17). Ce cisaillement, oblique sur le plan axial du pli initial, préserve la zone de charnière et affecte les deux flancs dans des sens opposés.

- Disposition sur un petit cercle dans la zone charnière; écart au petit cercle dans les flancs.

— Une déformation homogène des flancs ne rend pas compte de la disposition exacte des points dans cet exemple.

Interprétation: Pli né par flexion. Puis cisaillement hétérogène des flancs, dans le même sens sur les deux flancs.

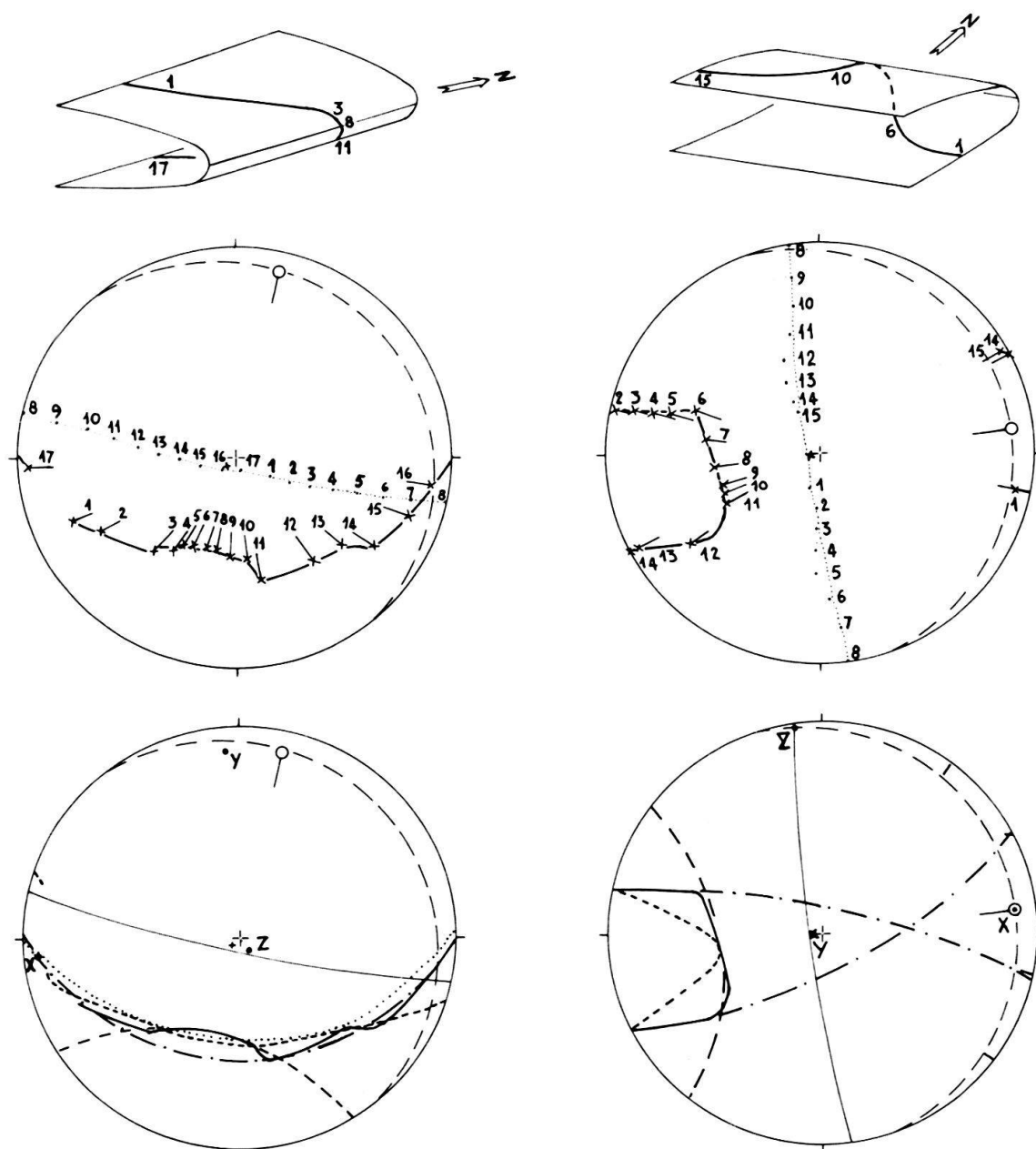


Fig. 6. Deux exemples de déformation de linéations autour de plis décimétriques dans les Schistes lustrés des Alpes cottiennes septentrionales (CARON 1977). Projection conforme, hémisphère supérieur.

Sur les stéréogrammes du bas *trait plein fort* = lieu des pôles des linéations déformées; *tiré long fort* = petit cercle correspondant aux pôles de la linéation dans la zone charnière; *pointillé* (à gauche) = approximation de grand cercle à partir de 5 ou 6 mesures seulement; *tiré court* = lieu des pôles de linéation obtenu par déformation homogène, à partir du petit cercle ($X/Y/Z = 5/1/1$ à gauche, $X/Y/Z = 2,75/2,75/1$ à droite); *trait point* = grands cercles correspondant aux lieux des pôles des linéations dans les flancs des plis.

b) Examen détaillé de linéations minérales

Les linéations minérales ne sont pas juste des lignes géométriques, et le comportement au cours de la déformation des minéraux qui les matérialisent joue un grand rôle lors de la réorientation de ces linéations. On peut ainsi observer que le dessin d'une linéation minérale n'est pas toujours rigoureusement rectiligne dans son plan porteur, mais qu'il est fait d'une succession de segments correspondant à deux orientations différentes. Les uns, linéation minérale dans la masse de la roche, correspondent à d'anciens minéraux réorientés passivement au cours de la déformation. Les autres, fibres néoformées, représentent un marqueur actif de la déformation. La part de fibres néoformées peut devenir prépondérante. On peut ainsi expliquer pourquoi les linéations minérales sont souvent très facilement réorientées lors d'une nouvelle déformation.

6. Conclusions

Les linéations déformées constituent un marqueur sensible de la direction, du type, et de l'intensité des déformations.

A partir des formules rappelées ci-dessus, la prédiction de l'orientation de linéations déformées peut être menée à bien dans de nombreux cas au moyen d'une simple calculatrice de poche.

Lors de l'étude de la déformation de linéations dans une région plissée, il faut observer attentivement la disposition des linéations autour de plis de détail. Dans la mesure où les charnières sont souvent plus préservées de l'accentuation des déformations que les flancs, il est possible de décomposer la progression des déformations en étapes successives.

Les linéations correspondent à des lignes réglées. Leur déformation conduit souvent à un nouveau réglage, après un stade transitoire de dispersion de leur orientation. L'étude de ces stades transitoires, lorsqu'ils sont encore observables dans des zones préservées d'une accentuation ultérieure de la déformation, peut permettre de mieux comprendre l'origine des linéations dans les zones les mieux réglées.

Enfin, les linéations minérales ne sont pas seulement des marqueurs passifs de la déformation; les fibres néoformées en constituent un marqueur actif. Il est fructueux de ne pas dissocier le problème géométrique de réorientation des lignes d'avec le problème pétrographique de croissance et de recristallisation des minéraux.

BIBLIOGRAPHIE

- CARON, J.-M. (1977): *Lithostratigraphie et tectonique des Schistes lustrés dans les Alpes cottiennes septentrionales et en Corse orientale*. – Sci. géol. (Strasbourg) [Mém.] 48.
- ELLIOTT, D. (1972): *Deformation paths in structural geology*. – Bull. geol. Soc. Amer. 83, 2621–2638.
- RAMBERG, H., & GHOSH, S.K. (1977): *Rotation and strain of linear and planar structures in three-dimensional progressive deformation*. – Tectonophysics 40, 309–337.
- RAMSAY, J.G. (1960): *The deformation of early linear structures in areas of repeated folding*. – J. Geol. 68, 75–93.
- (1967): *Folding and fracturing of rocks*. – McGraw-Hill, New York.
- STAUFFER, M.R. (1964): *The geometry of conical folds*. – New Zealand J. Geol. Geophys. 7, 340–347.
- WEISS, L.E. (1959): *Geometry of superposed folding*. – Bull. geol. Soc. Amer. 70, 91–106.