QUANTIFICATION DE LA DÉFORMATION

Il est possible de quantifier la déformation à partir de certains marqueurs géologiques en autant que l'on connaisse la forme initiale du marqueur en question. Le taux de déformation est obtenu en comparant la forme de l'objet déformé à sa forme initiale. Certains objets géologiques sont d'excellents marqueurs de la déformation comme les objets sphériques (oolithes, foraminifères, taches de réduction), les objets allongés (tiges de belemnite, minéraux aciculaires), les fossiles à symétrie bilatérale ou radiale (brachiopodes, trilobites, graptolites, crinoïdes, coraux) et les objets elliptiques (cailloux de conglomérats, enclaves).

Tous ces objets ont la particularité d'être plus compétents que la matrice qui les contient. Par conséquent, lorsque soumis à un état de contrainte donné, ils subiront une rotation passive rigide vers la direction d'extension maximale (S_1). Avec l'augmentation de la déformation, les objets allongés se boudineront et se fractureront mais seulement lorsqu'ils auront atteint le champ d'allongement de l'ellipse de la déformation. Ces objets ne se fractureront pas nécessairement dès les premiers instants de la déformation progressive, mais plutôt lorsque les contraintes exercées dépasseront la limite de rupture de l'objet en question.

À l'aide de ces ***marqueurs de la déformation***, il est possible de calculer la quantité de déformation subie par l'objet en mesurant le changement de longueur de l'objet étiré et boudiné et en le comparant à son l'état initial non déformé. On utilisera comme mesure de la déformation finie les rapports d'extension (e), d'étirement (S) ou d'élongation quadratique (λ) ainsi que les valeurs de déformation angulaire données par le cisaillement angulaire (ψ) et la déformation cisaillante (γ). En connaissant les paramètres de déformation linéaire et angulaire pour quelques objets déformés dans un même volume rocheux, il sera possible de reconstruire l'ellipse de la déformation et du même coup, utiliser l'ellipticité (R) comme mesure du taux de déformation pour ce volume rocheux.

LES OBJETS ALLONGÉS

Les figures 1, 3 et 4 présentent des objets géologiques allongés qui ont été étirés et fracturés. Les espaces entre les segments des objets fracturés ont été comblés par des minéraux fibreux dont l'axe d'allongement parallélise la direction d'étirement maximale de la roche déformée. La direction d'étirement maximale est aussi donnée par la trace du clivage sur la surface de l'affleurement.

À partir d'un seul fossile sur un affleurement, il est possible de calculer l'étirement ou l'extension subi par cet objet (Exercice 1). Il s'agit tout simplement de mesurer la longueur initiale du fossile en obtenant la somme de tous les segments boudinés (l_i) et de comparer cette valeur à la longueur totale déformée du fossile étiré (l_f). On pourra ainsi calculer les différents paramètres de la déformation linéaire (e, S et λ) à l'aide des équations suivantes:

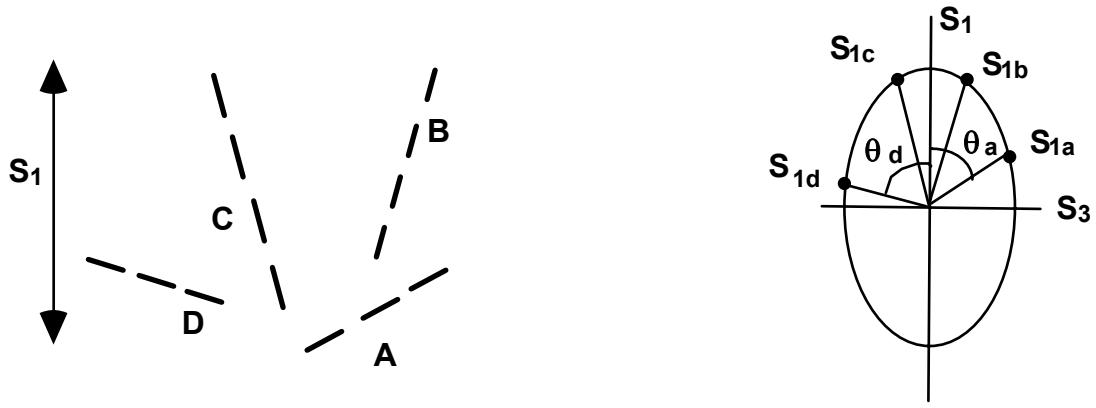
- l'allongement relatif ou extension : $e = dl/l = (l_f - l_i)/l_i$

(extension ou engineer's extension)

- l'étirement : $S = l_f/l_i = 1 + e$
  (stretch)
- l'élongation quadratique : $\lambda = (1 + e)^2$
  (Quadratic extension) aussi = $[(l_i/l_i) + (l_f - l_i)/l_i]^2 = (l_f/l_i)^2$

La présence de plusieurs objets allongés dans un même échantillon ou sur un même affleurement nous permettra non seulement de calculer l'étirement pour chaque fossile, qui représente en fait la déformation selon plusieurs directions dans un volume rocheux, mais aussi de calculer la forme de l'ellipse finale pour tout l'affleurement (Exercice 2). Il s'agira alors de calculer la déformation linéaire pour chacun des objets étirés et de déterminer l'angle θ entre chacun des objets et l'axe d'étirement maximal. L'ellipse de la déformation sera construite en plaçant les données obtenues pour chaque objet sur un graphique S_1 vs S_3 (figure 1).

FIGURE 1
Construction de l'ellipse de la déformation à partir de fossiles étirés



LES FOSSILES DÉFORMÉS

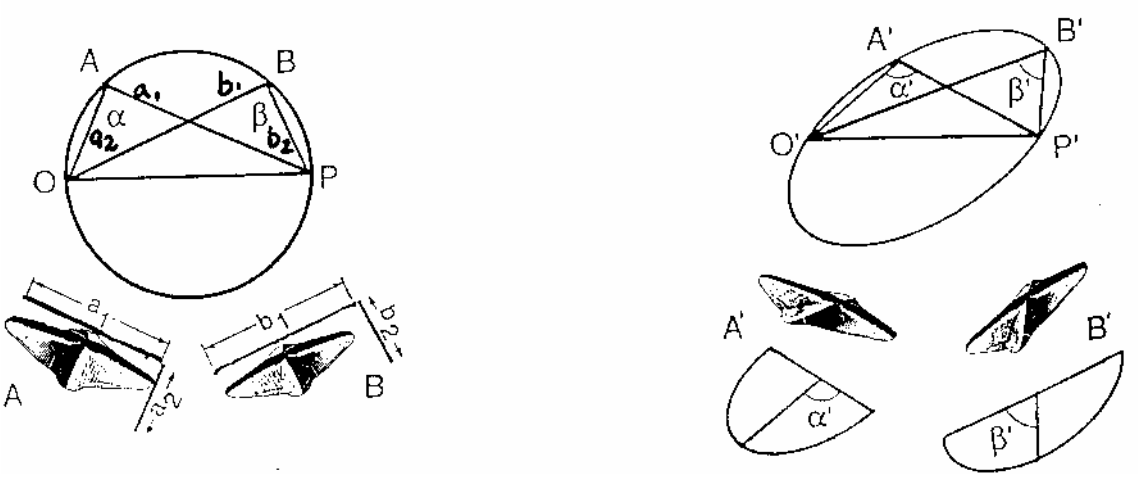
La symétrie bilatérale de certains fossiles est une caractéristique fort utile pour quantifier la déformation. L'on sait par exemple que l'angle entre la charnière et la ligne médiane chez les brachiopodes est de 90°. Il est donc possible de quantifier la déformation en comparant cet angle chez le fossile déformé (état final) au même angle sur le fossile non déformé (état initial). Plusieurs méthodes ont été conçues pour quantifier la déformation à l'aide des fossiles déformés. Celle de Wellman (1962), nécessite plus de six fossiles, et la méthode de Ramsay (1967) peut être utilisée avec aussi peu que trois fossiles.

La méthode de Wellman.

Cette méthode permet, à l'aide d'au maximum six fossiles déformés, de retracer l'ellipse de la déformation qui représente le taux de déformation enregistré par les fossiles. Pour un fossile à symétrie bilatérale non déformé, comme par exemple des brachiopodes illustrés à la figure 2, la charnière et la médiane sont orientées à 90° l'une de l'autre (figure 2a). Par contre, suite à une déformation, cette relation angulaire entre la

médiane et la charnière n'est plus respectée (figure 2b).

FIGURE 2 - Brachiopodes déformés



(a) fossiles non déformés et cercle correspondant
(b) fossiles déformés et ellipse représentant l'état de la déformation finie

Dans le cas des fossiles non déformés, il est possible de représenter graphiquement l'état non déformé par un cercle à rayon unitaire. Il s'agira de calquer sur une feuille de papier les parallèles aux médianes et charnières pour chacun des fossiles choisis. Ensuite sur une autre feuille, on tracera un segment (OP dans la figure 2a) et on y projettera les lignes médiane et charnière de chaque fossile à partir des extrémités du segment de façon à construire plusieurs parallélogrammes. Le périmètre du cercle sera tracé en reliant tous les sommets des parallélogrammes obtenus pour chaque fossile.

Pour un fossile déformé, les lignes originalement perpendiculaires dans l'état non déformé, ici les médianes et charnières de brachiopodes, seront réorientées dans l'espace. Il sera alors possible de représenter graphiquement l'état déformé des fossiles par une ellipse dont l'ellipticité correspondra au taux de déformation. Encore une fois, l'angle entre les lignes médiane et charnière nous permettra de reconstruire l'ellipse. Tout comme pour la méthode utilisée à la figure 2a, on tracera des parallèles à la ligne médiane et à la charnière pour chacun des fossiles choisis (figure 2b). On projettera ensuite les lignes médiane et charnière de chaque fossile à partir des extrémités d'un segment de façon à construire plusieurs parallélogrammes. L'ellipse de la déformation finie sera dessinée en reliant les sommets des parallélogrammes obtenus pour chaque fossile.

La méthode de Ramsay.

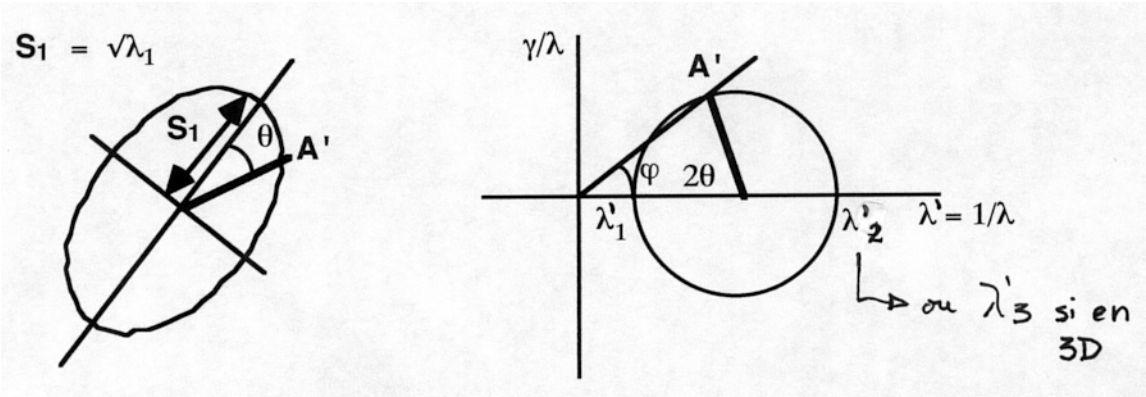
Dans certains cas, le nombre limité de fossiles déformés sur l'échantillon ne nous permet pas d'utiliser la méthode de Wellman. La méthode de Ramsay quant à elle, offre l'avantage d'être utilisée avec aussi peu que trois fossiles. Cette méthode est basée sur les équations du cercle de Mohr.

Revoyons les équations du cercle de Mohr en fonction de l'ellipse de la déformation, tel qu'illustré à la figure 3. Pour une description plus détaillée du cercle de

Mohr de la déformation, référez-vous aux pages 70 à 77 du volume de Davis et Reynolds (1996).

La structure mathématique des équations du cercle de Mohr permet une représentation graphique des paramètres de la déformation, soit la réciproque de l'élongation quadratique ($\lambda = 1/\lambda$) et une valeur modifiée de la déformation cisaillante ($\gamma' = \gamma/\lambda$) pour une déformation donnée.

FIGURE 3 - Ellipse de la déformation et cercle de Mohr correspondant



Les équations du cercle de Mohr s'expriment sous la même forme que les équations d'un cercle dont le diamètre du cercle est donné par $\lambda'_1 - \lambda'_3$, le rayon du cercle par $(\lambda'_1 - \lambda'_3)/2$, et l'origine du cercle par $(\lambda'_1 + \lambda'_3)/2$.

Les équations de la déformation peuvent être dérivées ainsi:

$$\lambda' = \lambda'_1 \cos^2\theta' + \lambda'_3 \sin^2\theta'$$

$$= (\lambda'_1 + \lambda'_3)/2 - (\lambda'_1 - \lambda'_3)/2 \cos 2\theta'$$

$$\gamma' = \gamma/\lambda = (\lambda'_3 - \lambda'_1)\sin\theta'\cos\theta'$$

$$= (\lambda'_3 - \lambda'_1)/2 \sin 2\theta'$$

et où:

• λ'_1 et λ'_3 correspondent respectivement aux réciproques de l'élongation quadratique ($\lambda' = 1/\lambda$) selon l'axe maximum et minimum de la déformation,

• θ' correspond à l'angle entre la direction d'extension maximale (S_1) et la ligne déformée,

• $\psi = \tan^{-1}\gamma = \tan^{-1}\ \gamma'/\lambda'$.

À l'aide de la méthode de Ramsay, il est possible de déterminer les paramètres S_1 et S_3 de l'ellipse de la déformation en connaissant la déformation linéaire et le cisaillement angulaire d'au minimum trois fossiles déformés.

Prenons comme exemple trois fossiles déformés (figure 4). Pour chaque fossile, il s'agit de trouver la valeur du cisaillement angulaire (ψ) et l'angle entre les charnières des fossiles duquel on pourra déduire les valeurs θ. Le cisaillement angulaire représente l'écart par rapport à l'angle initial entre la charnière et la ligne médiane (90° à l'état initial) (ψ sera positif pour un cisaillement dextre et négatif pour un cisaillement senestre, voir Fig. 2.49 dans Davis et Reynolds, p. 75). Ces données sont ensuite portées sur un diagramme de Mohr en prenant λ' et γ' comme axe horizontal et vertical.

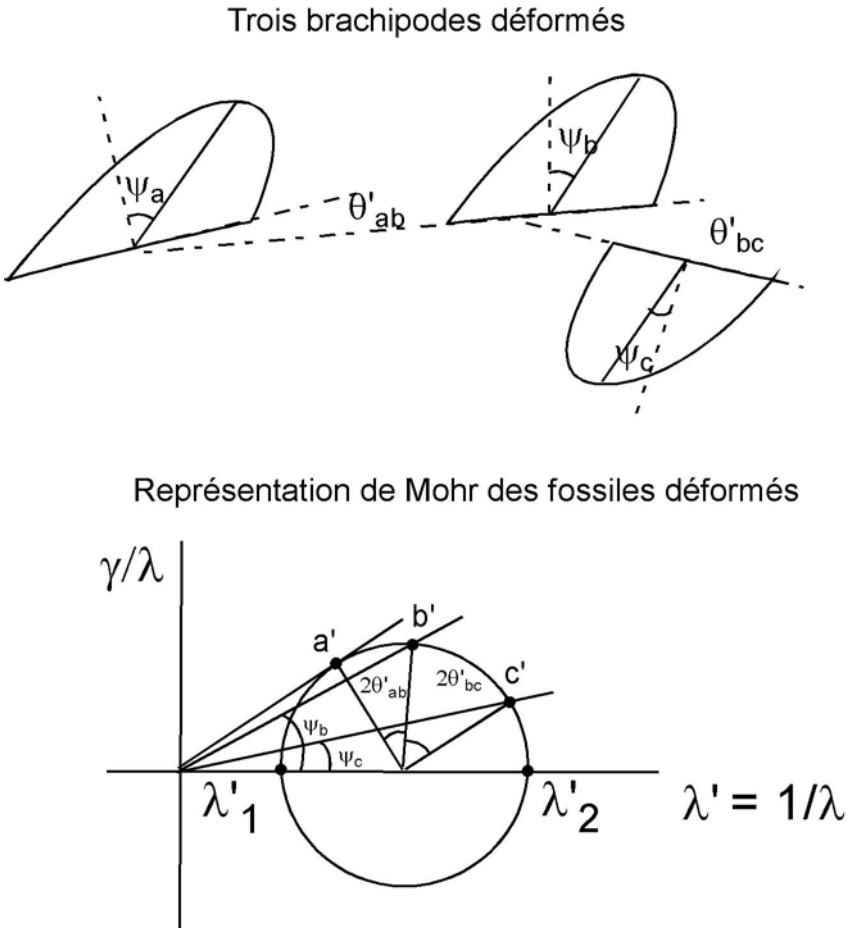


Figure 4: Diagramme de Mohr de trois brachiopodes déformés

Sur le digramme, chaque fossile est représenté par une droite passant par l'origine et orientées à ψ_a, ψ_b et ψ_c par rapport à λ'. À l'intérieur du cercle de Mohr, trois segments représentent les fossiles déformés. Les segments auront comme point d'origine commun l'origine du cercle et l'angle entre ces segments des trois fossiles correspondra à deux fois la valeur de l'angle mesurée entre les charnières des fossiles ($2\theta'ab$, $2\theta'bc$, $2\theta'ac$). Le diagramme ainsi construit permet de déterminer λ'_1 et λ'_2, S_1 et S_2, de calculer R et de déterminer l'orientation de l'ellipse de la déformation sur l'échantillon prélevé.

EXERCICE 1: la déformation linéaire.

1) Calculez la déformation linéaire en additionnant les longueurs l_1, l_2, et ainsi de suite, de la belemnite tronçonnée de la figure 5. Vous devez mesurer la longueur des fragments dans la direction parallèle à leur axe long. À quoi correspond la somme des l_i ?

2) Mesurez la longueur finale de l'objet, l_f, parallèlement au nouvel axe long de l'objet boudiné.

3) L'axe long de l'objet boudiné se situe à un angle θ de la direction du clivage dans la roche. Mesurez cet angle. La trace du clivage sur la figure 5 nous donne l'orientation d'une direction principale de la déformation, laquelle?

4) Trouvez le taux de déformation du fossile en calculant les paramètres de l'extension e, S, et λ. D'après vous, est-ce que le taux de déformation obtenu pour ce fossile reflète bien l'extension **maximale** selon cette direction? Sinon, peut-on trouver l'extension maximale pour cet objet étiré et boudiné? Est-ce que cette valeur correspond à la déformation **totale** (extension maximale) subie par la roche? Les valeurs calculées sont-elles valables pour tout l'affleurement voir toute la région?

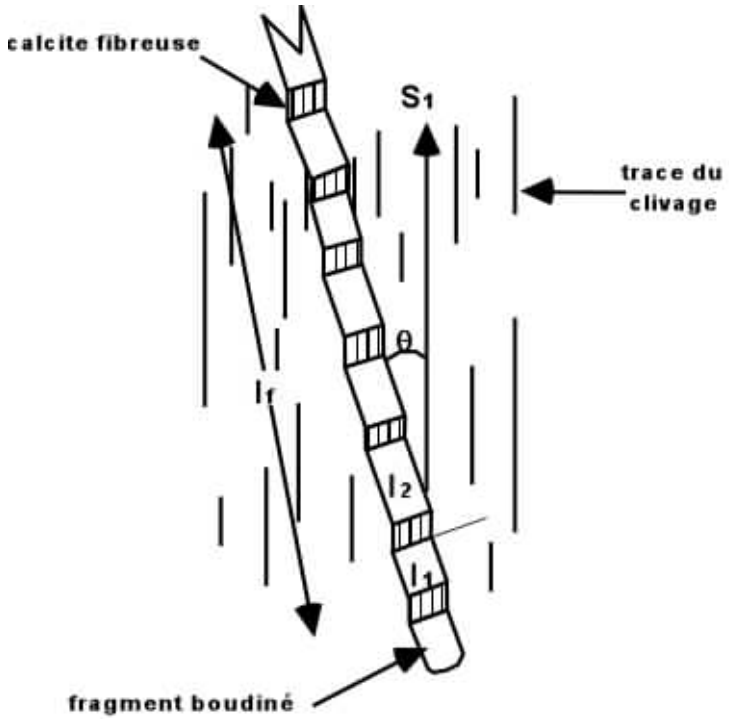


Figure 5: Croquis d'un fossile de forme allongé (belemnite) étiré et boudiné.

EXERCICE 2: l'ellipse de la déformation.

1) Calculez la déformation linéaire en additionnant les longueurs l_1, l_2, et ainsi de suite pour chacun des belemnites tronçonnées de la figure 6. Utilisez l'étirement (S) comme mesure de la déformation linéaire.

2) Déduisez la direction d'extension maximale pour l'ensemble de l'échantillon en observant l'orientation des fossiles déformés. Dessinez la trace possible du clivage sur la figure 6.

3) Quel renseignement précieux nous fournit le fossile non déformé? Comment se comporterait un fossile allongé orienté à 15° (horaire) par rapport au fossile non déformé?

4) Déterminez les angles θ_1, θ_2, etc., qui correspondent à l'angle entre les belemnites et l'axe d'étirement maximal.

5) Construisez l'ellipse de la déformation en plaçant les données obtenues pour chaque belemnite sur un graphique S_1 vs S_3. Sur ce diagramme, l'orientation de chaque fossile (l'angle θ_a) et le taux de déformation calculé (S_a) vous aidera à tracer l'ellipse de la déformation finie. Calculez le taux de déformation, l'ellipticité (R) pour ce site. Est-ce que le taux de déformation obtenu correspond à la déformation **totale** subie par la roche?

Croquis d'un affleurement contenant plusieurs belemnites étirés et boudinés

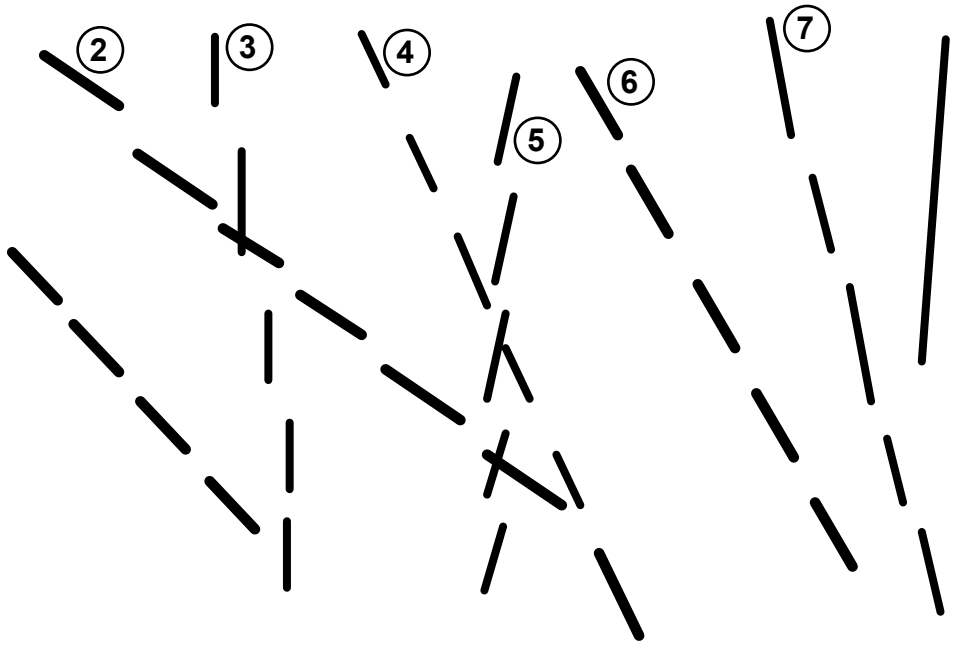


Figure 6

EXERCICE 3: La méthode de Wellman

1) Numérotez les fossiles de la figure 7 et tracez également une ligne de référence horizontale sur la figure. Sur un papier calque, retracez une ligne de référence horizontale ainsi que deux points, distants de quelques centimètres, sur cette ligne.

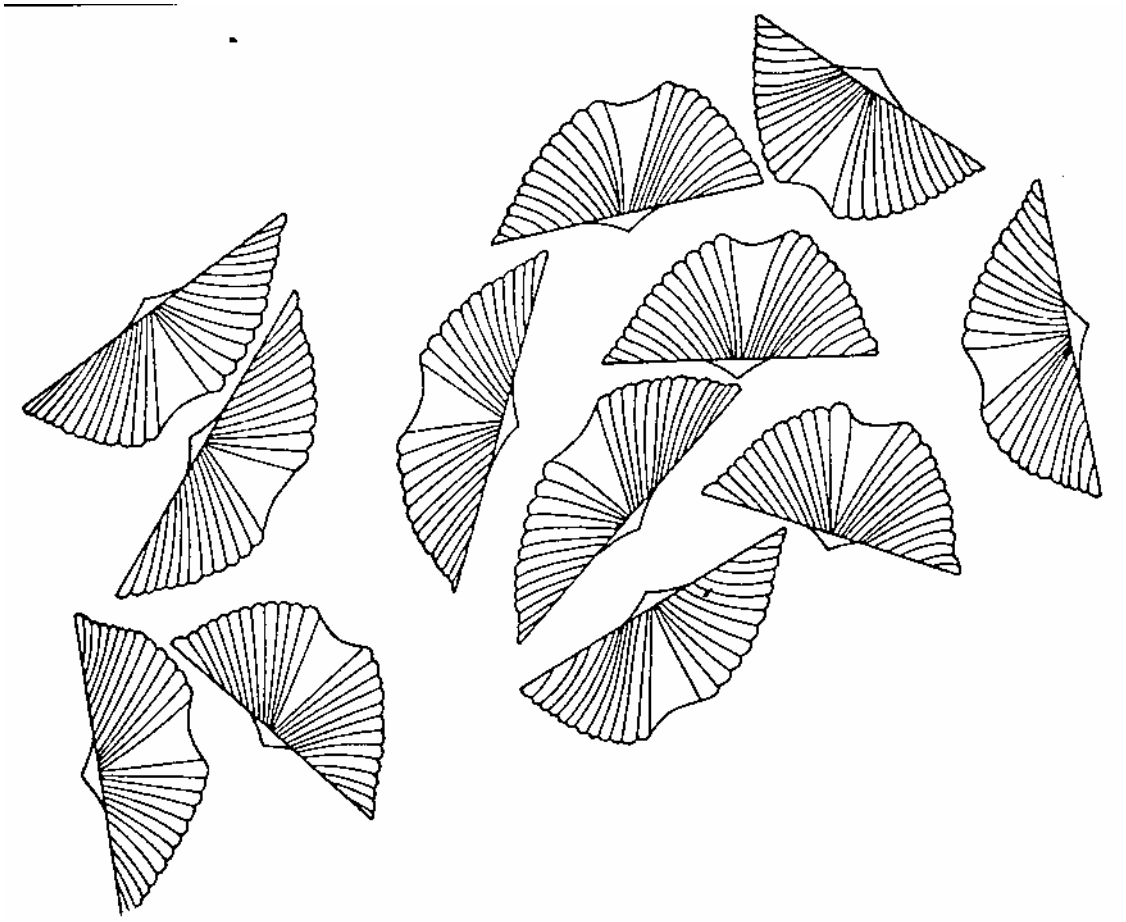
2) Superposez le papier calque à la figure 7 en prenant soin que les lignes de références soient bien parallèles. Positionnez un des deux points de la ligne de référence sur l'intersection entre la médiane et la charnière d'un fossile. À partir de ce point, tracez deux segments parallèles à la charnière et à la médiane du fossile. Répétez la même opération en déplaçant le calque de façon à ce que le second point se trouve à l'intersection entre la médiane et la charnière du fossile choisi. Les 4 segments tracés formeront un parallélogramme dont les côtés sont respectivement parallèles à la charnière et à la ligne médiane de chaque fossile.

3) Répétez les étapes expliquées au point 2 et tracez des parallélogrammes pour chaque fossile.

4) Tracez une ellipse à partir de tous les sommets des parallélogrammes. Calculez le taux de déformation de l'échantillon à partir de cette ellipse (R).

5) Peut-on déduire les directions principales de déformation ($1+e_1$ ou $\sqrt{\lambda_1}$ et $1+e_3$ ou $\sqrt{\lambda_3}$) sans procéder par la méthode de Wellman, simplement en examinant les fossiles déformés?

FIGURE 7 - Brachiopodes déformés



EXERCICE 4: La méthode de Ramsay

1) Les trois fossiles sur la figure 8 ont été déformés. Pour chaque fossile, vous devez trouver la valeur du cisaillement angulaire (ψ) en mesurant l'écart par rapport à l'angle initial entre la charnière et la ligne médiane (90° à l'état initial). N'oubliez pas de noter le sens de cisaillement pour chaque fossile. ψ sera positif pour un cisaillement dextre et négatif pour un cisaillement senestre (voir Fig. 2.49 dans Davis et Reynolds, p. 75).

2) Construisez un diagramme de Mohr en prenant λ' et γ' comme axe horizontal et vertical, respectivement. Tracez trois lignes passant par l'origine de ce diagramme et orientées à ψ_A, ψ_B et ψ_C par rapport à λ'. Les angles positifs seront tracés au-dessus de la l'axe λ' et les angles négatifs, sous l'axe λ'.

3) Maintenant mesurez l'angle entre les charnières des fossiles A et B ($\theta'a$), B et C ($\theta'b$) et A et C ($\theta'c$).

4) Sur une autre feuille, tracez un cercle de rayon donné. Tracez dans ce cercle trois segments qui représenteront les fossiles déformés. Les segments auront comme point d'origine commun l'origine du cercle et l'angle entre ces segments des trois fossiles correspondra à deux fois la valeur de l'angle mesurée en (3) ($2\theta'a$, $2\theta'b$, $2\theta'c$).

5) Superposez le cercle de Mohr que vous avez construit en (4) sur le graphique λ' vs γ' construit en (2) de façon à ce que les trois points du périmètre du cercle interceptent les lignes correspondantes du graphique, tracées à partir des angles ψ_A, ψ_B et ψ_C. Déterminez λ'_1 et λ'_3, S_1 et S_3 et calculez R.

6) À l'aide du cercle de Mohr obtenu en (4), déterminez l'orientation de l'ellipse de la déformation (les directions principales de déformation) sur la figure 4?

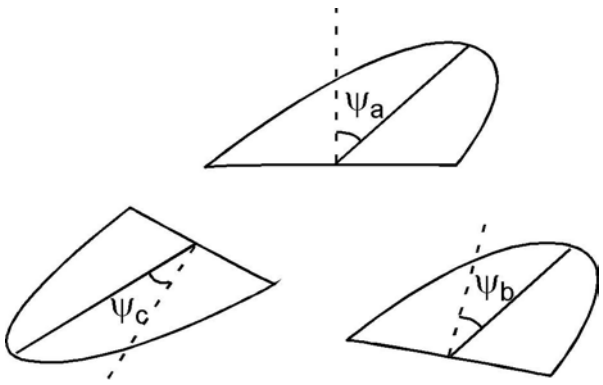


Figure 8: Croquis d'un affleurement contenant trois brachipodes déformés