EXERCICES PRATIQUES DU MODULE 2 (Partie B)
LA 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 d'oxydo-réduction, cavités gazeuses dans les laves), 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 dans une intrusive, coussins dans une coulée basaltique).

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, les objets allongés 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 (seulement lorsqu'ils auront atteint le champ d'allongement de l'ellipse de la déformation) et les objets circulaires deviendront elliptiques. Les objets rigides et compétents 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

À partir d'un seul objet de forme allongé sur un affleurement, il est possible de calculer la déformation linéaire subie par cet objet. Il s'agit tout simplement de mesurer la longueur initiale de l'objet (l_i) et de comparer cette valeur à la longueur totale déformée de l'objet (l_f). On pourra ainsi calculer les différents paramètres de la déformation linéaire (e, S et λ) selon les équations présentées plus haut.

Prenons comme exemple le fossile de forme allongée (belmnite), déformé et fracturé de la figure 1. Les espaces entre les segments de cet objet 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). Pour calculer la déformation linéaire du belemnite, 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).

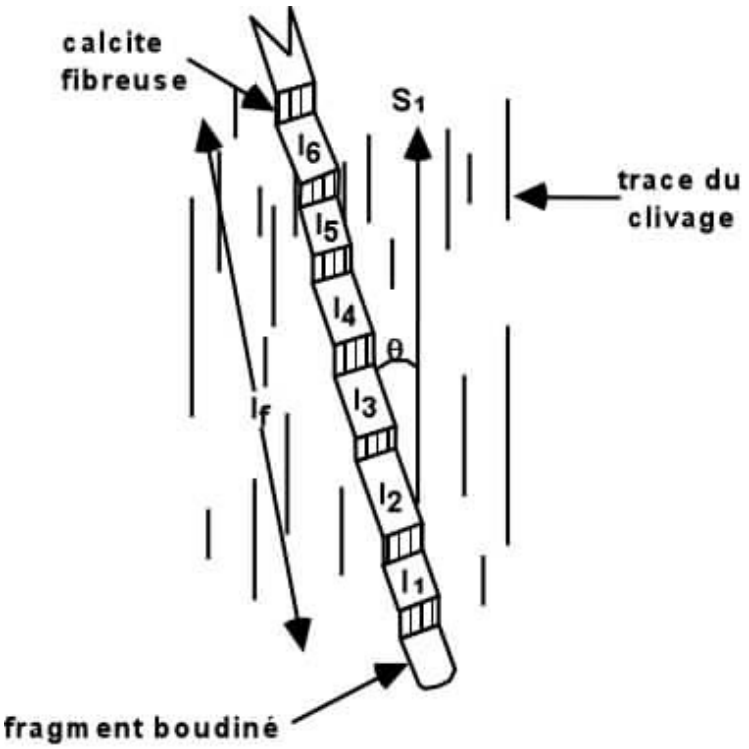


Figure 1: Croquis d'un affleurement contenant un fossile de forme allongée (belemnite) étiré et boudiné.

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. 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 2).

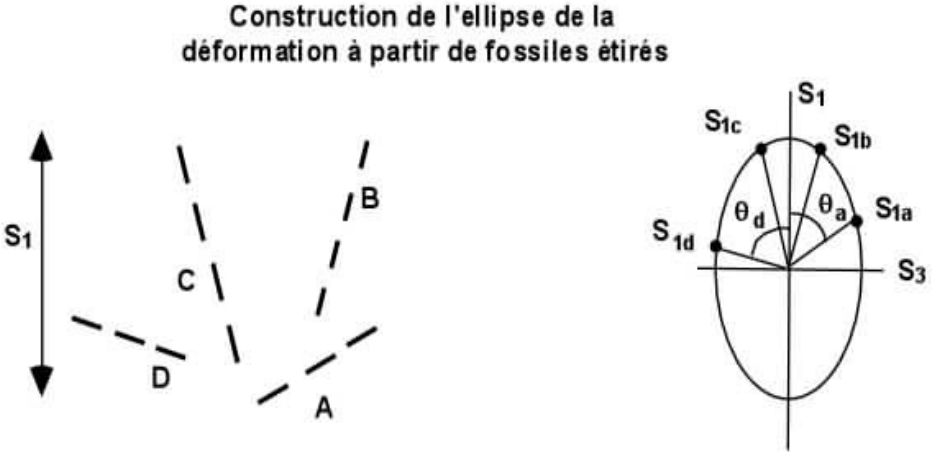


Figure 2

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 degrés. 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. La méthode de Wellman (1962), nécessite plus de six fossiles tandis que 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'un minimum de 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 3, la charnière et la médiane sont orientées à 90 degrés l'une de l'autre (figure 3a). Par contre, suite à une déformation, cette relation angulaire entre la médiane et la charnière n'est plus respectée (figure 3b).

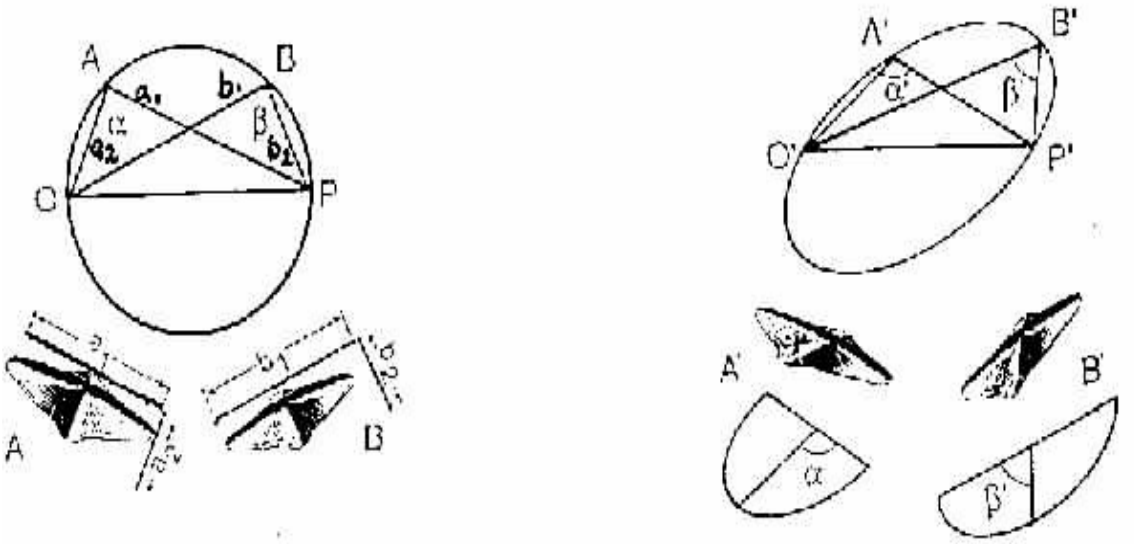


Figure 3: (a) brachiopodes non déformés et cercle correspondant, (b) brachiopodes déformés et ellipse représentant l'état de la déformation finie.

Dans le cas des fossiles non déformés, il est possible de représenter graphiquement l'état non déformé par un cercle à rayon unitaire tracé à partir de segments jointifs parallèles aux directions de symétrie principales des brachiopodes. Pour obtenir ce cercle, il s'agira de tracer un segment sur une feuille de papier (OP sur la figure 3a) à partir des extrémités desquelles on projettera des parallèles aux médianes et charnières pour chacun des fossiles choisis de façon à construire plusieurs parallélogrammes. Le cercle dessiné en reliant tous les sommets des parallélogrammes obtenus pour chaque fossile représente l'état de déformation nul de la roche.

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

médianes et charnière nous permettra de reconstruire l'ellipse. Tout comme pour la méthode utilisée à la figure 3a, on tracera des parallèles à la ligne médiane et à la charnière pour chacun des fossiles choisis (figure 3b). On projettera ensuite les lignes médianes 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.

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 1. 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 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 1 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?

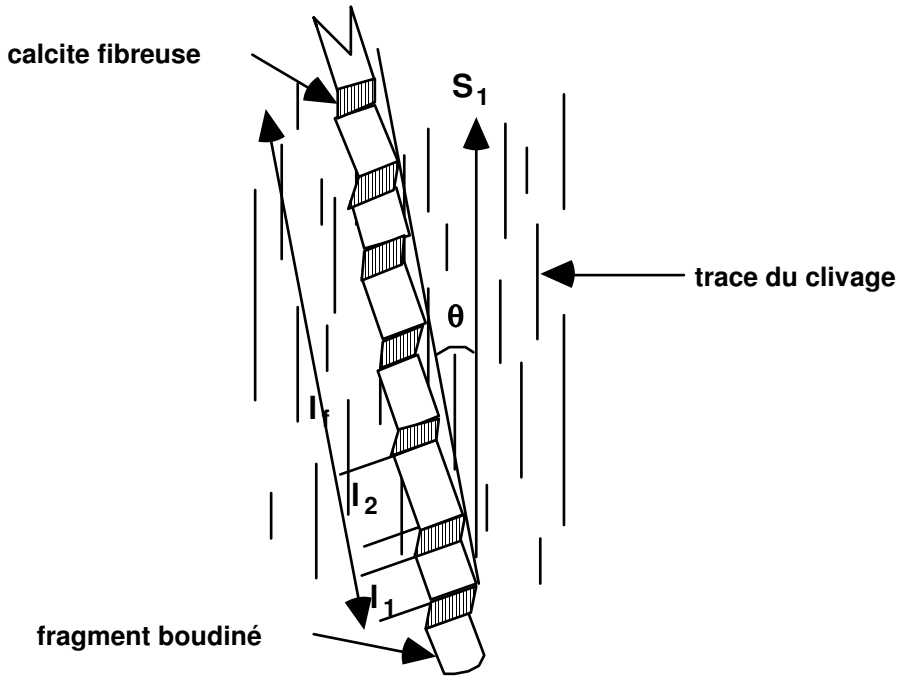


Figure 1: Croquis d'un affleurement contenant un fossile de forme allongée (belemnite) étiré et boudiné

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 2. 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 2.

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.

6. Quelles sont les valeurs de S_1 et S_3.

7. A l'aide de S_1 et S_3, construisez le diagramme de Mohr de la déformation.

8. A l'aide du cercle de Mohr de la déformation, déterminez quelle est la valeur de la déformation cisaillante (γ), le cisaillement angulaire (ψ) et l'étirement (S) pour un belemnite dont l'orientation finale est de -35° par rapport à S_1.

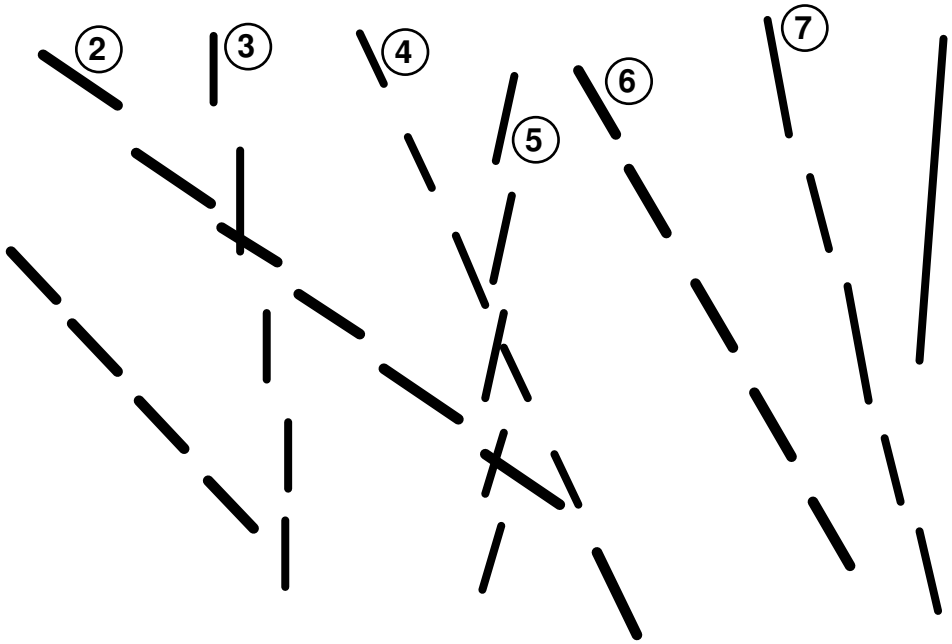


Figure 2: Croquis d'un affleurement contenant plusieurs fossiles de forme allongée (belemnites) étirés et boudinés

EXERCICE 3: La méthode de Wellman

1. Numérotez les fossiles de la figure 3 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 3 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 l'ellipticité R.

5. Peut-on déduire les directions principales de déformation (S_1 et S_3) sans procéder par la méthode de Wellman, simplement en examinant les fossiles déformés?

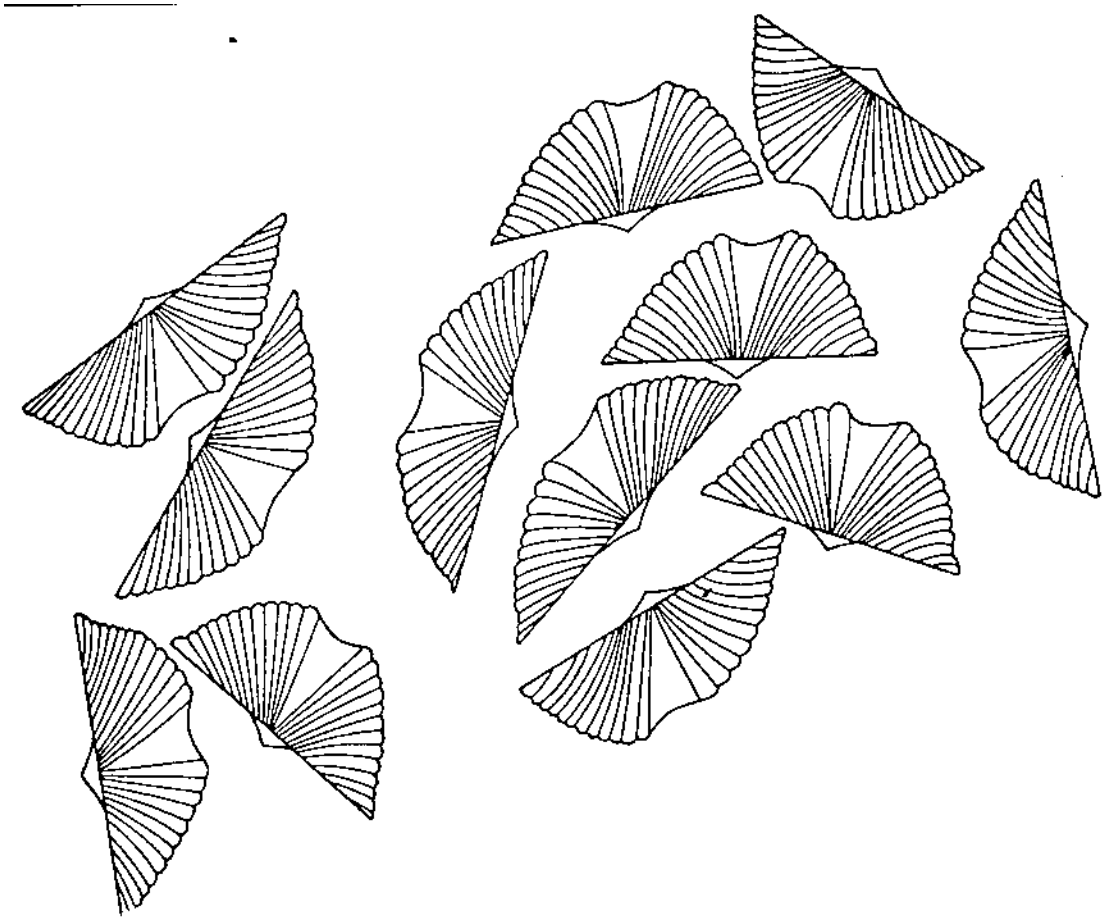


Figure 3: Croquis d'un affleurement contenant plusieurs fossiles de symétrie bilatérale (brachiopodes) déformés.