TUTORIEL 1

REPRESENTATION GRAPHIQUE DES DONNEES STRUCTURALES

Plusieurs techniques graphiques peuvent être utilisées pour analyser les éléments structuraux d'une région. Ces techniques ont pour objet de faciliter la reconnaissance d'un groupement ou d'une orientation préférentielle de certains éléments structuraux et de visualiser clairement les résultats.

HISTOGRAMMES ET ROSACES

Les **histogrammes** et les **rosaces** permettent de représenter l'orientation des structures planaires en deux dimensions et seront utilisés pour les structures sub-verticales (pendage ‹ 70°). Ils seront également utilisés pour représenter des structures dont le pendage n'est pas connu, par exemple si les données sont interprétées à partir d'images aériennes ou satellitaires. Les histogrammes permettent de représenter différentes classes de données en abscisses, par exemple de 0 à 180°, s'il s'agit de direction, avec les fréquences en ordonnée (figure 1).

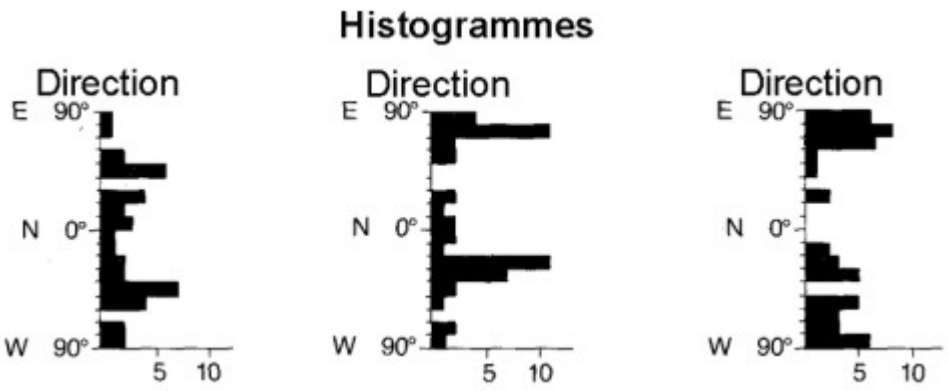


Figure 1 Histogrammes de joints relevés à trois stations différentes (modifiée de Davis et Reynolds (1996).

Dans le cas des rosaces, les directions seront données sur un cercle, regroupées en tranches de 5° ou 10° par exemple. Les fréquences sont proportionnelles à la longueur des rayons du cercle indiquant leur direction (figure 2).

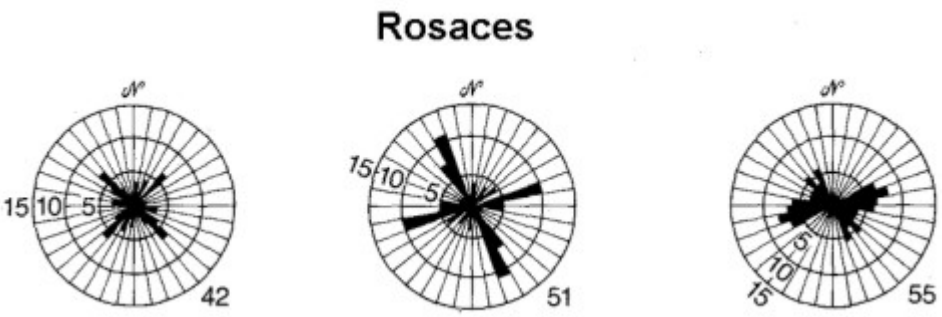


Figure 2 Rosaces de direction de joints relevés à trois stations différentes (modifié de Davis et Reynolds, 1996).

LES PROJECTIONS

Bien souvent, pour résoudre un problème général en géologie, nous devons préciser le problème en termes géométriques et tenter de le redéfinir graphiquement. Nous devons régénérer une nouvelle représentation graphique du problème en cause, comme, par exemple ajouter une vue en coupe à un plan déjà existant. Les techniques de la géométrie descriptive, qui ont pour but de donner une vision des figures dans l'espace à trois dimensions, nous aideront à poser et à résoudre ces types de problèmes. La géométrie descriptive est basée sur les projections et utilise des méthodes géométriques pour poser les problèmes sur une surface plane (2 dimensions) et pour les résoudre en trois dimensions. En géologie, trois types de projections nous permettent de générer des représentations graphiques afin de mieux comprendre la réalité géologique. Ces trois techniques consistent en des représentations en plan, soit en deux dimensions:

1. Les **techniques cartographiques** qui permettent de générer des représentations de ce qui est connu à la surface. On obtient une représentation en plan (deux dimensions) de données topographiques, hydrographiques et géologiques.

2. Les **projections orthographiques** (techniques de géométrie descriptive ou géométrie cotée) permettent de générer des représentations en coupe à partir des données de surface (carte). Ces représentations bidimensionnelles mettent en valeur les traits morphologiques des objets géologiques en fonction de leur extension en profondeur.

3. Les **projections stéréographiques** permettent de présenter des données tridimensionnelles sur une surface plane (bidimensionnelle). Il est possible de représenter les plans, les lignes et les points sur les projections stéréographiques. Cette technique facilite le traitement d'une quantité importante de données.

LES PROJECTIONS ORTHOGRAPHIQUES

Une projection est une représentation en deux dimensions (sur un plan) d'un objet tridimensionnel. En géologie, on utilise surtout des projections horizontales (vue en plan, projection cartographique) et verticales (projection en coupe, profils). Les projections dans un plan vertical, qu'on appelle coupes ou profils, sont les cas les plus simples de projections. Cependant, il arrive qu'on doive projeter sur des surfaces non verticales, lorsqu'on veut

présenter une vue en coupe d'un pli plongeant par exemple. La surface de projection devra alors être perpendiculaire à la plongée du pli.

Voyons d'abord les cas simples de projections verticales. Ces projections sont construites à l'aide de lignes de projections qui relient les points d'un objet à la surface de projection (figure 3). Les lignes de projections peuvent être perpendiculaires (c'est le cas pour les projections orthographiques) ou obliques à la surface de projection.

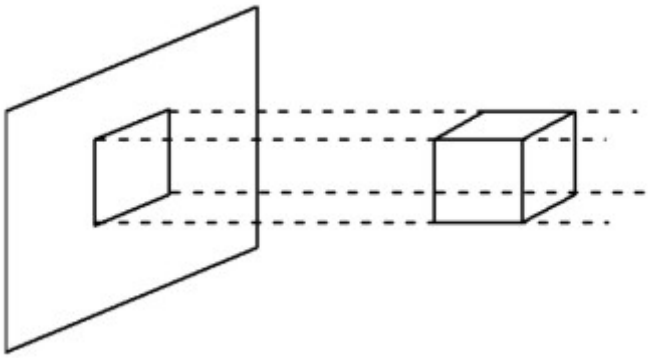


Figure 3 Projection d'un cube sur un plan. Dans le cas des projections orthographiques, les lignes de projection sont parallèles entre elles et perpendiculaires à la surface de projection.

Les projections les plus utilisées en géologie sont les projections verticales (profils ou coupes structurales) où la surface de projection est à 90° de la surface originale (figure 4). Bien souvent, la surface originale sera un **plan horizontal** (une carte géologique par exemple). La surface de projection quant à elle s'appellera le **plan frontal**. La ligne d'intersection entre les deux surfaces sera appelée la **ligne de rabattement**. Cette ligne sera visualisée comme une penture qui relie les deux surfaces entre elles.

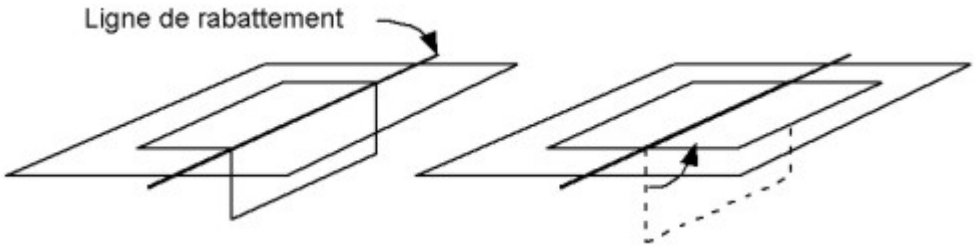


Figure 4 (a) Ligne de rabattement qui relie les deux surfaces de projection et qui agira comme une penture; (b) La projection frontale est rabattue dans le plan de projection horizontal par rotation de 90° autour de la ligne de rabattement.

Sur notre feuille de travail (figure 4b), les deux plans seront dessinés horizontalement et la projection frontale sera rabattue autour de la ligne de rabattement de 90° jusqu'à ce qu'elle se retrouve entièrement dans le plan de projection horizontal et conséquemment dans le plan de la feuille de travail.

Une fois le rabattement du plan frontal effectué, des droites relient les points du plan horizontal au plan frontal rabattu. Ces droites, qui s'appellent les **lignes de rappel**, seront toujours perpendiculaires à la ligne de rabattement. Lorsqu'on projette un objet qui se trouve à une certaine profondeur sous le niveau du sol, l'image du dessus de cet objet sera projetée dans le plan horizontal et l'image verticale dans le plan frontal (figure 5). Une ligne de rappel reliera un même point de l'objet d'une projection à l'autre.

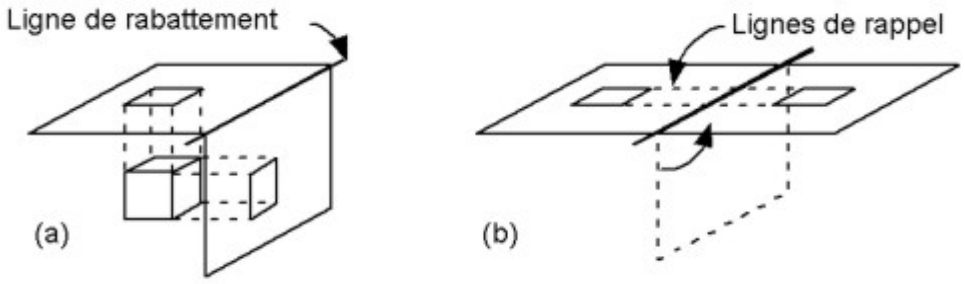


Figure 5 (a) Un cube projeté dans un plan horizontal et un plan frontal. (b) Dans la projection rabattue, les lignes de rappel relient un même point du cube d'une projection à l'autre. Ces lignes sont perpendiculaires à la ligne de rabattement.

LES PROJECTIONS STÉRÉOGRAPHIQUES

La technique de projection stéréographique est un outil performant qui permet de résoudre rapidement des problèmes d'ordre géométrique en géologie structurale. Ce type de projection est fondamentalement différent de la projection orthographique (techniques de géométrie descriptive), autre technique fréquemment utilisée en géologie structurale et qui préserve les relations spatiales entre les différents éléments structuraux. Les projections stéréographiques permettent de représenter la géométrie et l'orientation de lignes et de plans sans égard à leur relation spatiale; elles permettent en outre, de représenter des données tridimensionnelles sur une surface plane bidimensionnelle. Des problèmes géométriques tels que la détermination du pendage apparent d'une couche, de l'orientation de l'intersection entre deux plans, de l'angle entre deux lignes ou de deux plans, peuvent être résolus rapidement sur une projection stéréographique. Reste cependant que les projections orthographiques sont nécessaires lorsqu'on doit composer avec la relation spatiale des structures dans la troisième dimension, par exemple lorsque le relief topographique est important ou lorsqu'on travaille avec des projections sur plusieurs niveaux (plans d'une mine). Dans ces cas, une combinaison judicieuse des deux techniques nous permettra de résoudre tous les problèmes d'ordres géométrique et spatial.

L'utilisation de la technique de projection stéréographique est basée sur la représentation schématique de droites et de plans dans une sphère de référence. L'orientation de plans, de droites et de points dans l'espace est schématisée graphiquement en les projetant sur la moitié inférieure de cette sphère à partir du centre de celle-ci (figure 6).

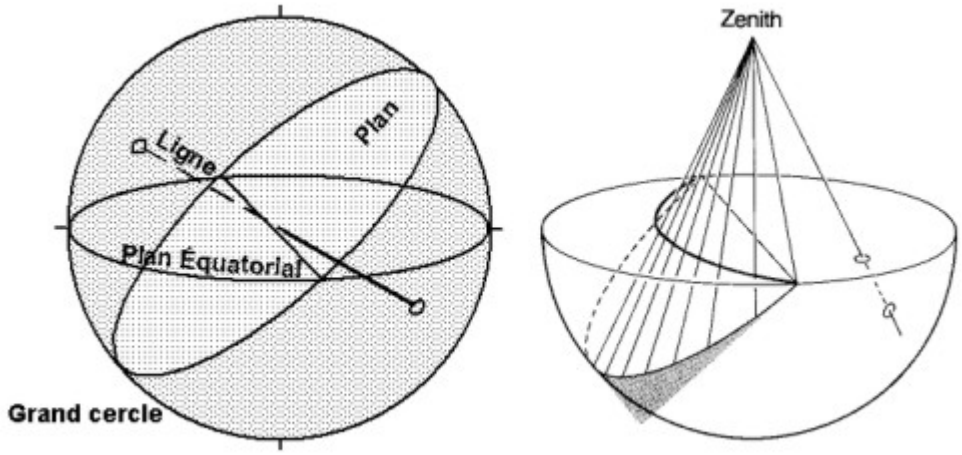


Figure 6 (a) Projection sphérique; et (b) projection stéréographique d'un plan et d'une droite (modifié de Davis et Reynolds, 1996).

Sur une projection sphérique, un plan orienté aléatoirement dans l'espace sera représenté schématiquement par une courbe correspondant à l'intersection entre ce plan et l'hémisphère inférieur de la sphère de référence (figure 6b). De même, la projection sphérique d'une droite est représentée par le point d'intersection entre cette droite et l'hémisphère inférieur de la sphère englobant la ligne (figure 6b). Les projections stéréographiques sont construites à partir des projections sphériques en projetant les traces de plans et de lignes sur la surface équatoriale de la sphère à partir du point zénith.

Le graphique sur lequel les données sont projetées, le canevas de Wulff, est divisé en 360 plans d'inclinaisons différentes autour du diamètre N-S d'une sphère de référence. Ce graphique est analogue à une projection équatoriale de la surface de la Terre (figure 7). Ce type de projection est dit **conforme** ou **équiangulaire** puisqu'il conserve les angles entre les plans et les lignes. Par contre pour analyser la fréquence ou la densité des données structurales, on doit utiliser une projection **équivalente** ou **équiaire**, le canevas de Schmidt ou de Lambert, qui conservera le rapport entre deux éléments de surface (voir Davis et Reynolds, 1996, figure H.3, page 695).

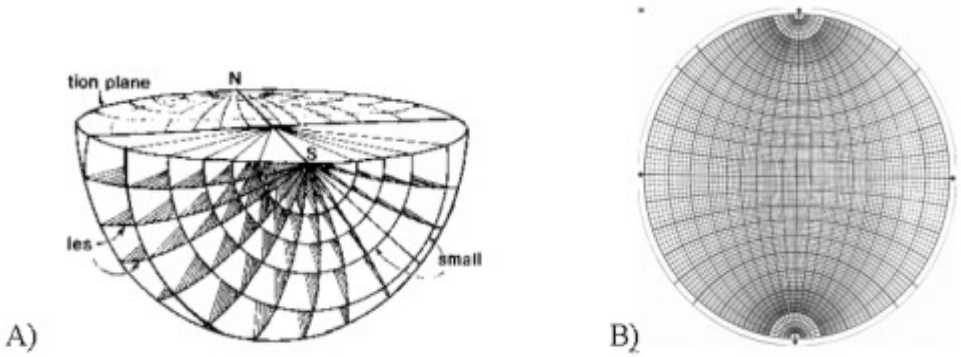


Figure 7 (a) Projection sphérique; et (b) stéréographique (tirés de Marshak et Mitra, 1988 et de Davis et Reynolds, 1996).

La projection stéréographique de données structurales est représentée soit par des courbes ou par des points sur la section circulaire horizontale de l'hémisphère, les courbes (ou grands cercles) représentant les plans et les points (ou pôles) représentant les droites (figure 8). Sur une projection stéréographique, les droites de forte plongée seront représentées par des points situés plus près du centre de la projection tandis que pour les droites de faible plongée les points seront situés plus près du périmètre de la projection (figure 8b. De même, les grands cercles de plans fortement inclinés auront un faible rayon de courbure tandis que ceux représentant des plans faiblement inclinés auront un rayon de courbure plus prononcé (figures 8d et 8f). De même, un plan vertical sera représenté par une droite, dont l'orientation correspondra à sa direction, et un plan horizontal correspondra au pourtour du stéréogramme.

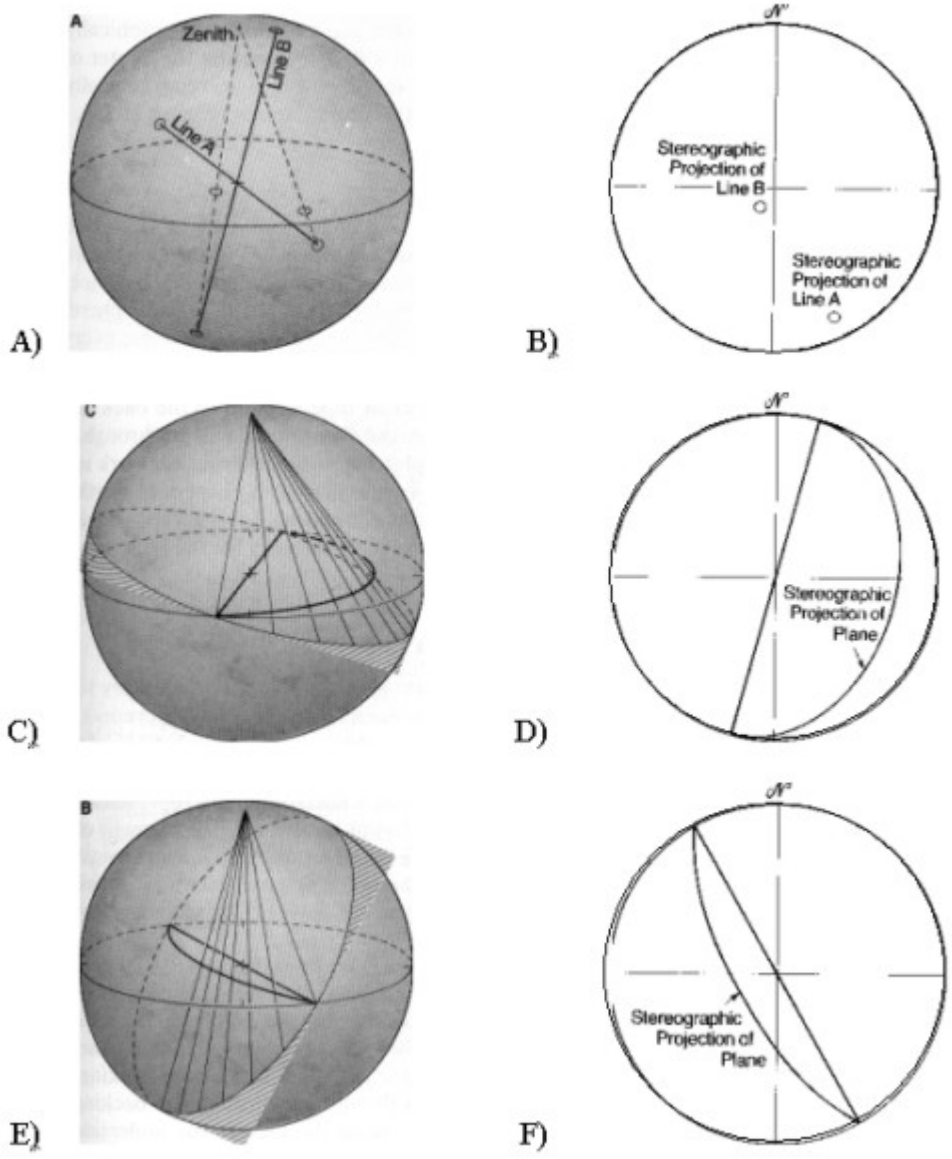


Figure 8 Projections sphériques et stéréographiques de droites et de plans. a) et b) Droites d'inclinaison différente. c), d), e) et f) Plans d'inclinaison différente (tiré de Davis et Reynolds, 1996).

TECHNIQUE DE PROJECTION STÉRÉOGRAPHIQUE

Les éléments géologiques linéaires sont définis géométriquement à l'aide de leur direction et de leur plongée, soit l'angle entre la droite et l'horizontale mesurée dans un plan vertical. Les éléments planaires sont définis géométriquement à l'aide de leur direction, soit la ligne horizontale passant par le plan (s sur la figure 9A), et par leur pendage, soit l'angle que fait le plan avec l'horizontale, mesurée dans un plan vertical, et la direction de cet angle (δ sur la figure 9a). On peut représenter un plan soit par son grand cercle ou par un point qui correspond au pôle de ce plan (π, soit la perpendiculaire au plan).

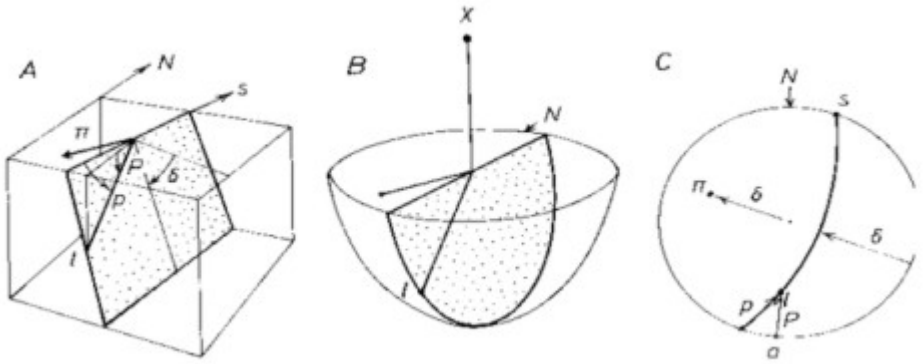


Figure 9 Projection stéréographique de plan et de droite (tiré de Ramsay et Huber, 1983).

PROJECTION DE LIGNES

Représentons une droite orientée à N190/40 sur une projection stéréographique (figure 10). Pour faciliter la projection, il est conseillé de placer un papier-calque sur le canevas et d'y tracer la circonférence et l'origine du cercle ainsi que les repères N-S-E-W. Il s'agit de repérer la direction 190° sur la circonférence du canevas et d'effectuer une rotation de 190° du claque autour du centre du canevas de façon à ce que le repère 190° soit situé sur le Nord. Calculer 40° sur l'axe N-S, qui représente le plongement de la ligne dans l'espace, et tracer un point. Retourner le canevas à sa position de départ.

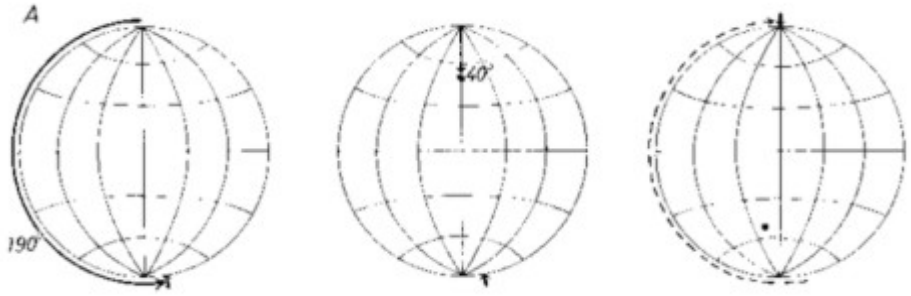


Figure 10 Technique de projection stéréographique d'une droite (tiré de Ramsay et Huber, 1983).

PROJECTION DE PLANS

Prenons l'exemple d'un plan orienté à N21/72. Commençons par tracer son grand cercle (figure 11). Il s'agit de repérer la direction 21° sur la circonférence du canevas et d'effectuer une rotation de 21° du claque autour du centre du canevas de façon à ce que le repère 21° soit situé sur le Nord. Calculer 72° sur l'axe E-W du cercle à partir du point Est de la circonférence. Choisir le grand cercle qui correspond à cet angle et tracer ce grand cercle.

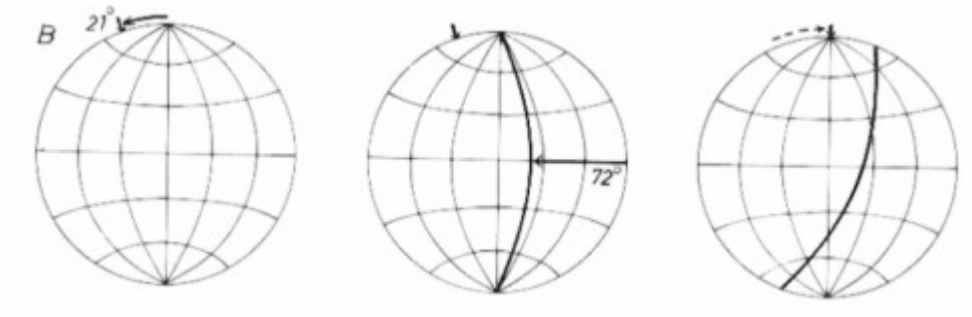


Figure 11 Technique de projection stéréographique d'un plan (tiré de Ramsay et Huber, 1983).

PROJECTION DE LA NORMALE À UN PLAN (PÔLE)

Voyons maintenant comment tracer le pôle de ce plan (figure 12). Il s'agit de repérer la direction 21° sur la circonférence du canevas et d'effectuer une rotation de 21° du claque autour du centre du canevas de façon à ce que le repère 21° soit situé sur le Nord. Calculer 72° sur l'axe E-W du cercle à partir de l'origine du cercle et vers l'ouest, puisqu'on cherche le pôle du plan. Choisir le grand cercle qui correspond à cet angle et tracer un point.

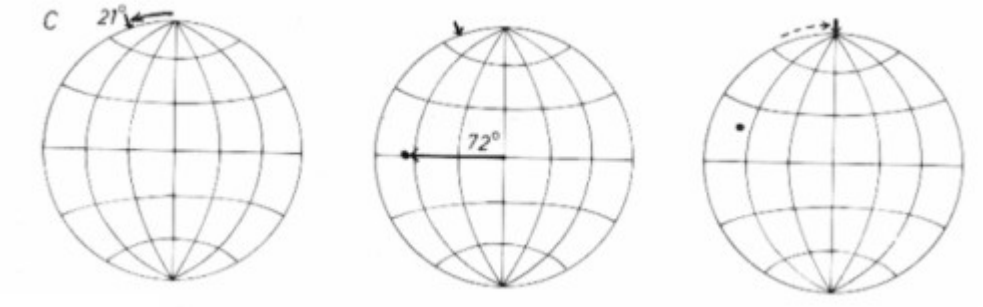


Figure 12 Technique de projection stéréographique de la normale d'un plan (tiré de Ramsay et Huber, 1983).

PROJECTION D'UNE LIGNE DANS UN PLAN

Sur une projection stéréographique, une droite contenue dans un plan doit se situer sur le grand cercle qui représente ce plan. Prenons par exemple le cas de stries de faille orientées à N310/40 sur un plan de faille orienté à N190/44. En géologie structurale, il est souvent utile de travailler avec l'angle de chute (rake ou pitch) d'une droite dans un plan. Cette valeur se

trouve facilement sur une projection stéréographique et correspond à la valeur angulaire calculée sur le plan, du périmètre jusqu'au point représentant la droite (figure 13).

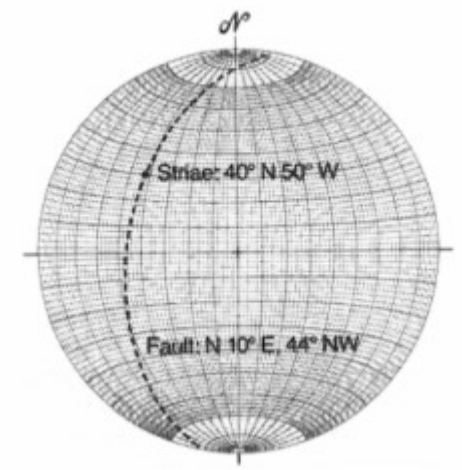


Figure 13 Technique de projection stéréographique d'une ligne dans un plan (tiré de Davis et Reynolds, 1996).

L'ANGLE ENTRE DEUX LIGNES

Géométriquement, il suffit de deux droites pour définir un plan. Aussi, sur une projection stéréographique, ces droites seront contenues dans le plan défini. Prenons par exemple deux droites orientées à N42/16 et N164/80. Il s'agit de positionner les deux points représentant la projection des droites, sur un même grand cercle. Ceci correspond en fait à trouver le seul plan possible passant par ces deux droites. Concrètement, l'on doit tourner le calque jusqu'à ce que les deux points soient positionnés sur le même grand cercle. Pour calculer l'angle entre les deux droites, il s'agit de mesurer l'angle aigu entre les deux points sur le grand cercle (figure 14).

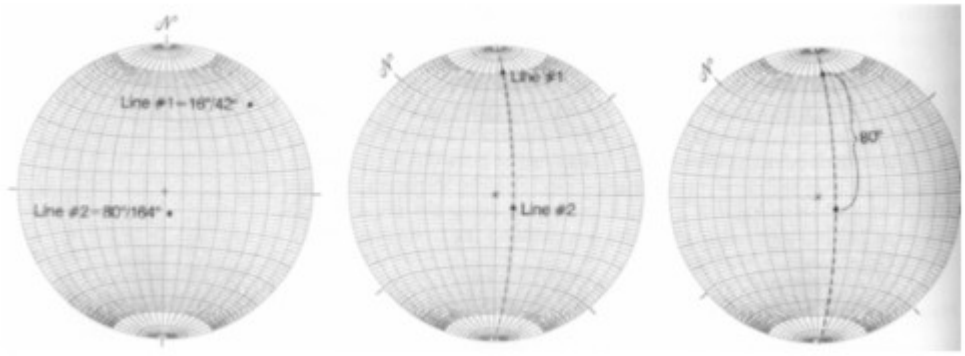


Figure 14 Projection stéréographique de l'angle entre deux lignes (tiré de Davis et Reynolds, 1996).

L'INTERSECTION ENTRE DEUX PLANS: DIRECTION, PLONGEMENT ET ANGLE DE CHUTE (RAKE OU PITCH)

Sur une projection stéréographique, la ligne d'intersection entre deux plans correspond au point d'intersection des grands cercles de ces plans (*i* sur la figure 15). Pour trouver l'angle entre deux plans, il s'agit de projeter les plans sur le stéréogramme et de trouver leur pôle respectif (πA et πB sur la figure 15). Le problème est donc réduit à trouver l'angle entre deux lignes.

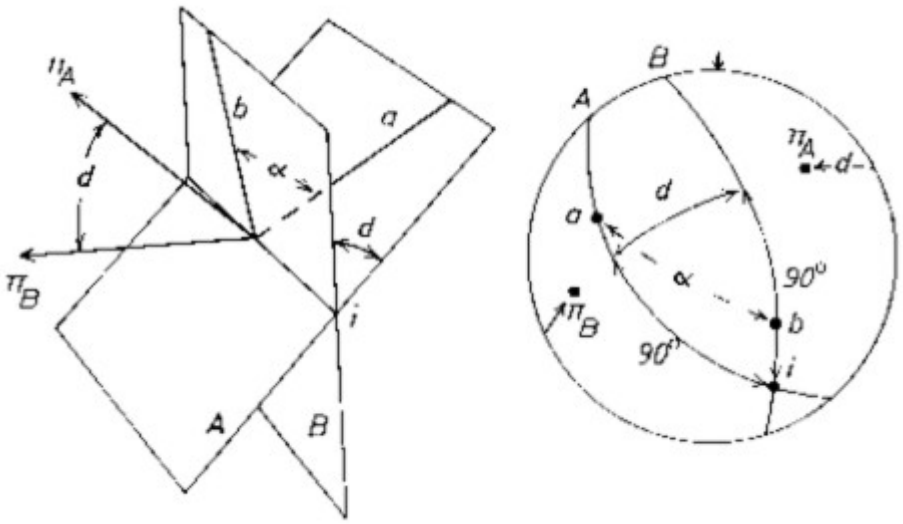


Figure 15 Projection stéréographique de l'intersection et de l'angle entre deux plans (tiré de Ramsay et Huber, 1986).

Il est aussi possible de mesurer l'angle de chute de l'intersection entre les deux plans dans un ou l'autre des deux plans. Prenons par exemple le plan orienté à N160/70 de la figure précédente et cherchons l'angle de chute de l'intersection sur ce plan. On doit ramener le grand cercle de ce plan sur l'axe N-S et calculer la distance angulaire entre le pourtour du stéréogramme et le point d'intersection sur le grand cercle représentant le plan, soit 23° vers le SE (figure 16).

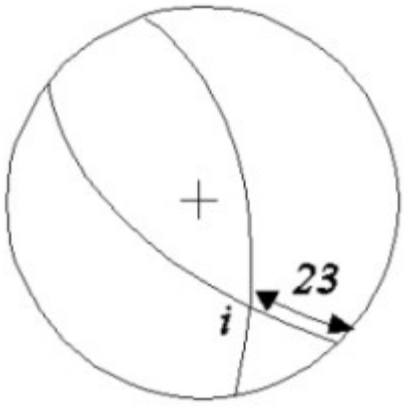


Figure 16 Projection stéréographique de l'angle de chute d'une droite (ici l'intersection entre les deux plans) sur un des deux plans.

TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES STRUCTURALES

Le traitement statistique des données structurales s'effectue sur des projections stéréographiques équiaires et a pour objet de faciliter la reconnaissance d'un groupement ou d'une orientation préférentielle de certains éléments structuraux. Le stéréogramme reporte un nuage de points correspondant aux données structurales mesurées sur le terrain. Le traitement des données débute par un comptage qui consiste à dénombrer les points à l'intérieur de chaque maille d'une grille superposée au stéréogramme (figures 17a et 17b). Les données seront par la suite converties en pourcentage par rapport au nombre total de points du diagramme puis inscrits à chaque maille de la grille (figure 17c). Des contours d'isodensité sont tracés sur le stéréogramme de façon à dégager des orientations préférentielles qui peuvent être significativement plus importantes que d'autres (figure 17d). Pour le stéréogramme de Schmidt, l'unité de surface de comptage correspond à un cercle qui représente 1% de la surface totale du canevas équiaire. Les diagrammes ainsi produits sont des diagrammes de densité qui permet de dégager (ou non) des orientations préférentielles parmi un nombre élevé de données structurales (figure 17e).

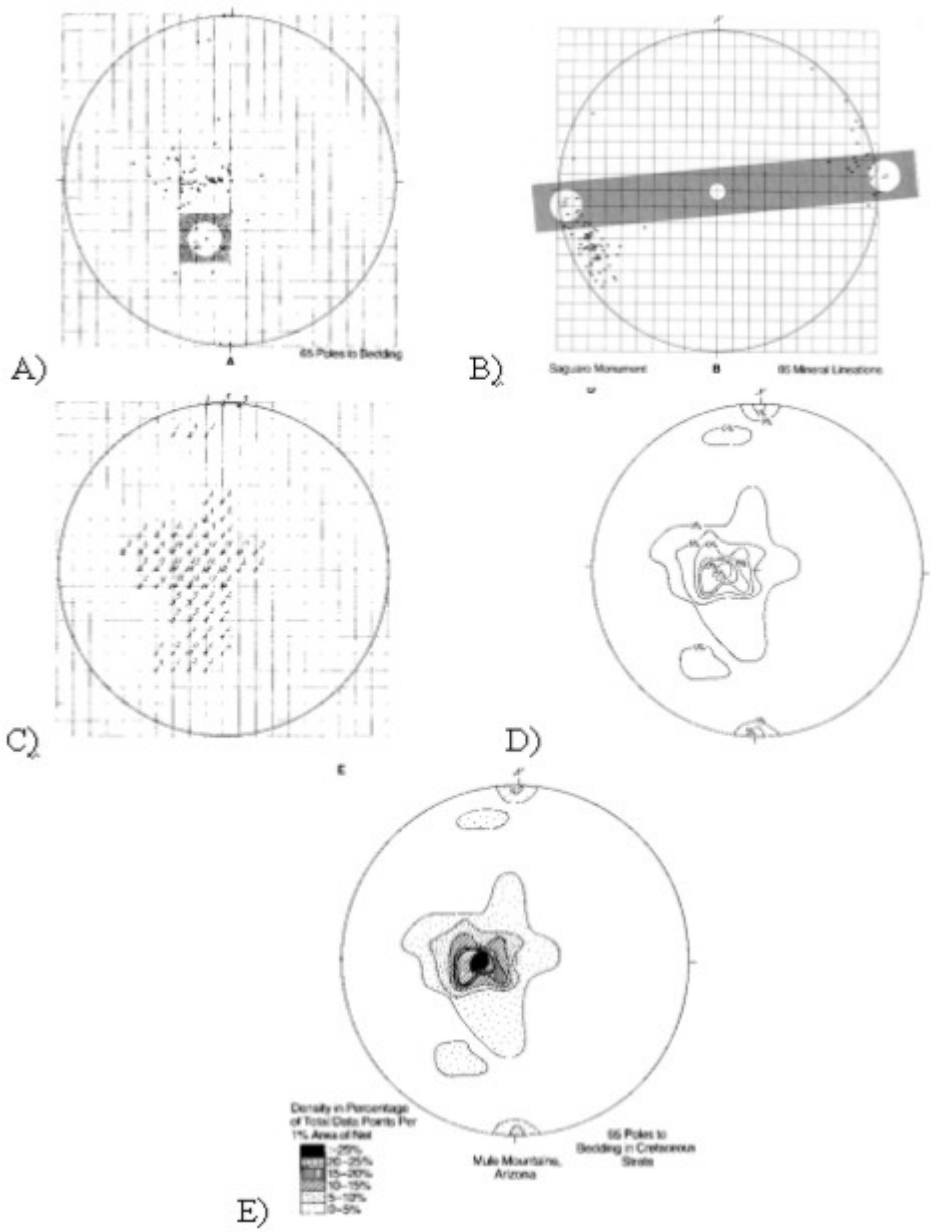


Figure 17 Étapes à suivre pour la projection stéréographique de densité. (a) et (b) Comptage de la densité de points par surface; (c) et (d) Nb de données par unité de surface et densité en % = Nb de pts par surface de 1%/Nb total de pts x 100; et (e) Contours de densité en (%).

BIBLIOGRAPHIE

Ce document a été préparé à partir des volumes de référence de géologie structurale suivants que vous pouvez consulter pour des renseignements supplémentaires concernant les techniques de représentations graphiques de données structurales.

Davis, G.H. and Reynolds, S.J., 1996. Structural geology of rocks and regions, 2nd Edition, John Wiley and Sons, New York, 776 p.

Hatcher, R.D. 1995. Structural geology, principles, concepts and problems, 2nd Edition, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 525 p.

Hobbs, B.E., Means W.D and Williams, P.F., 1976. An outline of structural geology, John Wiley and Sons, 571p.

Marshak, S. and Mitra, G., 1988. Basic methods of structural geology, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 446 p.

Ramsay, J.G. and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology, vol. 1: strain analysis, Academic Press, London, 307p.

Vialon, P., Ruhland, M. et Grolier, J., 1976. Éléments de tectonique analytique, Masson, Paris, 118 p.

EXERCICE 1 – Les projections stéréographiques

1. Sur un stéréogramme de Wulff, projeter les axes de pli suivants: N40/26 et N245/75.

2. Sur un stéréogramme de Wulff, projeter les plans de stratification orientés à N65/52, N142/23, N219/02, N 242/88, N284/78, N 312/67 et N352/43. Sur un deuxième stéréogramme tracer les pôles de ces plans.

3. Sur un stéréogramme de Wulff, projeter les plans de clivage suivants: N140/30, N80/20, N227/67 et N337/75. Sur un deuxième stéréogramme trouver les pôles de ces plans.

4. Quelle est la plongée de stries mesurées sur un plan de faille (N110/43) dont la direction est de N160? Trouvez l'angle de chute des stries sur le plan de faille.

5. Projeter sur un stéréogramme de Wulff une linéation minérale de direction N225 sur un plan de foliation orienté à N170/58. Trouver la plongée et l'angle de chute de la linéation minérale.

6. Quelle est la plongée de stries dont la direction mesurée sur un plan de faille orienté à N337/72 est de N000? Trouvez l'angle de chute de ces stries sur le plan de faille.

7. Déterminer la linéation d'intersection L_0^1 entre la stratification (N100/20) et le clivage (N30/70).

8. Calculer l'intersection entre la stratification orientée à N190/41 et le plan de clivage orientée à N125/26, ainsi que l'angle entre les deux plans.

9. Calculer la direction, le plongement et l'angle de chute de l'intersection entre une strate orientée N200/30 et une veine à N130/20. (il y a deux angles de chute à calculer)

10. Une roche métamorphique polydéformée contient deux linéations minérales, N10/14 et N122/58, contenues dans un même plan de foliation. Déterminer l'orientation du plan de foliation, l'angle de chute de chacune des linéations et l'angle entre les linéations mesurée dans le plan de foliation.

11. Trouver le pendage apparent suivant une coupe verticale de direction N60 d'une strate orientée à N40/40.

12. Trouver le pendage apparent sur une face exploitée d'une carrière orientée à N350, d'un dyke orienté à N25/65. Idem pour une strate orientée à N321/65 sur une face orientée à N20. Quels sont les pôles de ces deux plans ?

13. Trouver la direction et le pendage d'une strate qui affleure à deux endroits sur une coupe de route et dont le pendage apparent est de 32° sur une face orientée à N256 et de 27° sur une seconde face orientée à N125. Trouver le pôle de ce plan.

14. Une strate montre deux pendages apparents, un de 10SE suivant une coupe de direction N160 et l'autre de 20NW suivant une coupe de direction N280. Quelle est l'orientation de la strate?

15. Deux parois verticales dans une carrière de direction N280 et N20 montrent qu'une strate planaire présente des pendages apparents de 40NW et de 50NE. Trouver la direction et le pendage de la strate. Quel serait le pendage apparent de cette strate sur une paroi de direction N90?

16. Un des deux flancs d'un pli a une direction de N310/35 et l'autre N210/50. Calculer le plongement de l'axe du pli. Si le pli était traversé par une faille orientée à N100/60, quels seraient les angles de chute des intersections des flancs du pli avec le plan de faille?